



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN OPTIMAL *LOAD FREQUENCY CONTROL* (LFC)
DENGAN *SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE*
(SMES) PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO
HIDRO MENGGUNAKAN METODE *FIREFLY ALGORITHM* (FA)**

**Tsabit Mustarin
NRP 2210 100 703**

**Dosen Pembimbing
Prof.Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Ir. Teguh Yuwono**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**

FINAL PROJECT - TE 141599

**OPTIMUM DESIGN OF LOAD FREQUENCY CONTROL (LFC)
WITH SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE
(SMES) IN MICRO HYDRO POWER SYSTEM USING FIREFLY
ALGORITHM METHOD**

**Tsabit Mustarin
NRP 2210 100 703**

**Supervisor
Prof.Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Ir. Teguh Yuwono**

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015**

**DESAIN OPTIMAL LOAD FREQUENCY CONTROL (LFC)
DENGAN SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY
STORAGE (SMES) PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA MIKRO HIDRO MENGGUNAKAN METODE
FIREFLY ALGORITHM (FA)**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT

NIP. 196308171990031001

Ir. Teguh Yuwono

NIP. 195008061976121002



**Desain Optimal *Load Frequency Control* (LFC)
dengan *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES)
pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro
Menggunakan Metode *Firefly Algorithm***

Tsabit Mustarin
2210 100 703

Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Dosen Pembimbing II : Ir. Teguh Yuwono

Abstrak:

Perkembangan teknologi pengendali pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro saat ini semakin meningkat. Sistem tenaga mikro hidro dipilih karena memiliki kelebihan secara ekonomis, teknis, dan juga ramah lingkungan untuk digunakan pada daerah yang sulit dijangkau jaringan listrik PLN. Permasalahan yang sering terjadi pada sistem pembangkit mikro hidro adalah terjadinya putaran tidak konstan generator yang disebabkan oleh perubahan beban yang tersambung. Sehingga menyebabkan terjadinya fluktuasi frekuensi pada sistem yang dapat mengakibatkan kerusakan peralatan listrik. Oleh karena itu dalam tugas akhir ini dibahas sebuah strategi pengendali frekuensi berbasis *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES). SMES merupakan peralatan yang dapat menyimpan energi dengan cepat dalam bentuk medan magnet pada kumparan superkonduktor. Untuk mendapatkan parameter SMES yang optimal pada sistem pembangkit mikro hidro ini digunakan metode *Firefly Algorithm* (FA). Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan FA terhadap PID SMES pada sistem pembangkit mikro hidro, dapat mempercepat *settling time* respon perubahan frekuensi dan juga memperbaiki *overshoot* respon frekuensi sistem.

Kata kunci : mikro hidro, SMES, kontroler PID, FA.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

***Optimum Design of Load Frequency Control (LFC)
with Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)
in Microhydro Power System Using Firefly Algorithm Method***

Tsabit Mustarin
2210 100 703

Supervisor I : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Supervisor II : Ir. Teguh Yuwono

Abstract:

The development of control technology in micro-hydro power plant is currently increasing. Micro hydro system chosen because it has advantages economically, technically, environmentally friendly and also to be used in areas that difficult to reach PLN grid. Problems that often occur at the micro hydro generator system is inconstant rotation on the generator caused by changes in the connected load. Thus causing frequency fluctuations in the system that could result in damage to electrical equipment. Therefore, in this final project discussed a strategy-based frequency control Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES). SMES are devices that can store energy in the form of fast magnetic field in the superconducting coil. To obtain the optimal parameters of SMES in this micro hydro generator system used method Firefly Algorithm (FA). The simulation results show that the implementation of FA to PID SMES controller on the mycro hydro generation system, can accelerate the settling time on frequency changes response and also improves the frequency response overshoot.

Keywords: *micro hydro, SMES, PID controller, FA.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah *subhanahu wata'ala*, karena hanya pertolongan dan rahmat Allah semata penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul:

Desain Optimal Load Frequency Control (LFC) dengan Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Menggunakan Metode Firefly Algorithm (FA)

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada bidang studi teknik sistem tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada berbagai pihak yang telah memberi bantuan dan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir, terutama kepada :

1. Kedua orang tua dan kerabat penulis, yang telah memberikan doa, motivasi, bimbingan, dan nasehat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, kritik, saran dan motivasi kepada penulis saat menjadi anggota laboratorium PSOC maupun selama menyelesaikan tugas akhir.
3. Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, pengarahan dan koreksi kepada penulis mulai dari analisa data, penyusunan proposal sampai *finishing* dari Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT. selaku Kajur Teknik Elektro ITS dan seluruh dosen Jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah memberikan bimbingan dan ilmu pengetahuan selama perkuliahan.
5. Seluruh staff dan karyawan Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan bantuan administrasi.
6. Sahabat dan rekan saya Rian Wahyu, Suharto, Dwi Didit, Mas Tufiq Ramadhan, Mas Herlambang Setiadi, Mas Fani, Mas Candra P, Mas Afif, Mas Wandu, Ibu Hidayatul Nurrohman, Bapak Otong, Bapak Aji, Bapak Andi Imran, Bapak Dani, teman-teman e50 dan

teman-teman laboratorium PSOC yang bersedia berdiskusi dan memberikan saran maupun kritik dalam Tugas Akhir ini.

7. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang tidak dapat penulis sebutkan.

Penulis berharap semoga apa yang ada di dalam Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca terutama mahasiswa Teknik Elektro..

Surabaya, Januari 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Metodologi	3
1.5. Sistematika Penulisan	4
1.6. Relevansi	4
BAB 2 TEORI PENUNJANG	5
2.1. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	5
2.2. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga	7
2.2.1. Kestabilan Sudut Rotor	8
2.2.2. Kestabilan Tegangan	8
2.2.3. Kestabilan Frekuensi	10
2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro	11
2.3.1. Turbin Air	12
2.3.2. Generator Induksi	15
2.3.3. Governor	18
2.3.4. Bagian Pendukung Mikro Hidro	20
2.4. <i>Load Frequency Control</i> (LFC)	21
2.5. <i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i> (SMES)	22
2.5.1. Konstruksi SMES	24
2.5.2. Mode Operasi SMES	25
2.5.3. Pemodelan SMES pada STL	26

2.6. <i>Firefly Algorithm</i> (FA)	28
2.6.1. Intensitas Cahaya dan Daya Tarik	30
2.6.2. Penskalaan dan Pembatasan	30
2.7. Kriteria Ruth-Hurwitz	31
BAB 3 PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA	33
3.1. Metodologi Penelitian	33
3.2. Pemodelan Sistem Secara Keseluruhan	34
3.2.1. Model Pembangkit Listrik Mikro Hidro	34
3.2. 2. Model SMES	36
3.3. Metode <i>Firefly Algorithm</i> (FA)	37
3.4. Simulasi Sistem	40
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	47
4.1. Perbandingan Respon Frekuensi pada Sistem Mikro Hidro	47
4.1.1. Respon Frekuensi pada Sistem Mikro Hidro tanpa Menggunakan <i>controller</i>	47
4.1.2. Respon Frekuensi pada Sistem Mikro Hidro Dengan Menggunakan <i>Controller</i> PI	50
4.1.3. Respon Frekuensi pada Sistem Mikro Hidro dengan Menggunakan <i>Controller</i> SMES	52
4.1.4 Respon Frekuensi pada Sistem Mikro Hidro dengan Menggunakan <i>Controller</i> SMES+PI	54
4.2. Perbandingan Respon Frekuensi Pembangkit Menggunakan <i>Energy Storage</i> Berbeda	57
BAB 5 PENUTUP	61
5.1. Kesimpulan	61
5.2. Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	xix
INDEKS	xxi
RIWAYAT HIDUP	xxiii

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Parameter pembangkit listrik mikro hidro	36
Tabel 3.2 Parameter SMES	37
Tabel 3.3 Parameter FA	39
Tabel 3.4 Parameter SMES (2)	40
Tabel 4.1 Nilai <i>overshoot</i> dan <i>settling time</i> gambar 4.1	48
Tabel 4.2 <i>Eigen value</i> untuk mikro hidro tanpa <i>controller</i>	49
Tabel 4.3 <i>Overshoot</i> dan <i>settling time</i> dengan <i>controller</i> PI	51
Tabel 4.4 <i>Eigen value</i> mikro hidro dengan <i>controller</i> PI	52
Tabel 4.5 <i>Overshoot</i> dan <i>settling time</i> dengan <i>controller</i> SMES	53
Tabel 4.6 <i>Eigen value</i> mikro hidro dengan <i>controller</i> SMES	54
Tabel 4.7 <i>Overshoot</i> dan <i>settling time</i> dengan <i>controller</i> SMES+PI	55
Tabel 4.8 <i>Eigen value</i> mikro hidro dengan <i>controller</i> SMES+PI	56
Tabel 4.9 <i>Overshoot</i> dan <i>settling time</i> SMES dan CES	59

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Klasifikasi kestabilan STL	7
Gambar 2.2 Skema turbin pembangkit mikro hidro	13
Gambar 2.3 Diagram blok turbin air	14
Gambar 2.4 Karakteristik torka-kecepatan generator induksi	16
Gambar 2.5 Sebuah generator induksi beroperasi sendiri dengan kapasitor bank untuk mensuplai daya reaktif	17
Gambar 2.6 Karakteristik arus-tegangan generator induksi	17
Gambar 2.7 Diagram Blok generator induksi	18
Gambar 2.8 Tampilan umum pembangkit mikro hidro	21
Gambar 2.9 Konfigurasi SMES	23
Gambar 2.10 Mode pengisian SMES	25
Gambar 2.11 Mode <i>freewheeling</i> SMES	25
Gambar 2.12 Mode <i>discharging</i> SMES	26
Gambar 2.13 Diagram blok SMES	28
Gambar 2.14 Pergerakan kunang-kunang	29
Gambar 3.1 Diagram alur pelaksanaan tugas akhir	34
Gambar 3.2 Diagram blok sistem mikro hidro	35
Gambar 3.3 Diagram blok <i>controller</i> SMES	36
Gambar 3.4 Diagram alur metode FA	38
Gambar 3.5 Grafik konvergensi FA	39
Gambar 3.6 Diagram blok perbandingan pembangkit	41
Gambar 3.7 Diagram blok mikro hidro tanpa <i>controller</i>	41
Gambar 3.8 Diagram blok mikro hidro dengan <i>controller</i> PI	42
Gambar 3.9a Diagram blok mikro hidro dengan <i>controller</i> SMES	42
Gambar 3.9b Diagram blok <i>controller</i> SMES tanpa PI	43
Gambar 3.10a Diagram blok mikro hidro dengan SMES+PI	44
Gambar 3.10b Diagram blok <i>controller</i> SMES dilengkapi PI	44
Gambar 4.1 Respon frekuensi mikro hidro tanpa <i>controller</i>	48
Gambar 4.2 <i>Eigen value</i> mikro hidro tanpa <i>controller</i>	49
Gambar 4.3 Respon frekuensi mikro hidro dengan PI	50
Gambar 4.4 <i>Eigen value</i> mikro hidro dengan PI	51
Gambar 4.5 Respon frekuensi mikro hidro dengan SMES	52
Gambar 4.6 <i>Eigen value</i> mikro hidro dengan <i>controller</i> SMES	53
Gambar 4.7 Respon frekuensi mikro hidro dengan SMES+PI	55

Gambar 4.8	Eigen value mikro hidro dengan SMES+PI	56
Gambar 4.9	Grafik perbandingan respon frekuensi	57
Gambar 4.10	Grafik konvergensi metode FA pada sistem dengan CES	58
Gambar 4.11	Perbandingan respon frekuensi sistem dengan SMES dan CES	59

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

LFC	:	<i>Load Frequency Control</i>
PID	:	<i>Proportional Integral Differential</i>
SMES	:	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
CES	:	<i>Capasitive Energy Storage</i>
AVR	:	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
FA	:	<i>Firefly Algorithm</i>
PSO	:	<i>Particle Swarm Optimization</i>
ITAE	:	<i>Integral Time Absolute Error</i>
CDI	:	<i>Comprehensive Damping Index</i>
PLTMH	:	Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro
PLTA	:	Pembangkit Listrik Tenaga Air
PLN	:	Perusahaan Listrik Negara
GTO	:	<i>Gate Turn Off Thyristor</i>
PCS	:	<i>Power Conversion System</i>
VSI	:	<i>Voltage Source Inverter</i>
VSC	:	<i>Voltage Source Converter</i>
K_p	:	Konstanta Proporsional
K_i	:	Konstanta Integrator
K_d	:	Konstanta Differensial
U	:	Kecepatan air dalam penstock
G	:	Posisi Gate
H	:	Ketinggian jatuh air (head)
V	:	Vektor tegangan bus
L	:	Panjang saluran mikro hidro
A	:	Luas penampang pipa
$\Delta E'_{qi}$:	Perubahan tegangan transient mesin ke- j .
$\Delta E'_{qi}$:	Perubahan tegangan transient mesin ke- i .
ρ	:	Kerapatan massa
a_g	:	Percepatan disebabkan gravitasi
ρLA	:	Massa air dalam saluran
$\rho a_g \Delta H$:	Perubahan tambahan pada tekanan di gate turbin

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi yang digunakan untuk pembangkit listrik saat ini sebagian besar berasal dari energi fosil. Selain harganya yang relatif mahal, energi fosil ini juga terbatas persediaanya serta menimbulkan kerusakan pada lingkungan. Oleh karena itu perlu penggunaan energi alternatif baru yang ramah lingkungan, ekonomis dan *renewable*. Beberapa alternatif sumber energi tersebut antara lain adalah angin, surya (matahari), serta air. Indonesia merupakan negara tropis dengan sumber daya alam yang melimpah. Selain itu, Indonesia juga merupakan negara kepulauan yang mempunyai banyak dataran tinggi yang mengalir sungai ataupun air terjun. Oleh karena itu, Indonesia mempunyai potensi yang besar untuk memanfaatkan energi alternatif yang ramah lingkungan, ekonomis dan *renewable* terutama adalah air. Dengan adanya potensi air ini maka dapat dikembangkan pembangkit-pembangkit listrik tenaga air dengan skala besar maupun kecil. Pembangkit listrik tenaga air skala kecil yang sedang banyak dikembangkan adalah pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH). PLTMH ini diharapkan dapat membantu memenuhi kebutuhan energi listrik terutama untuk wilayah pedesaan terpencil dan belum terjangkau listrik dari PLN. Sehingga aktifitas masyarakat pedesaan ini lebih dimudahkan.

Program Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) merupakan salah satu prioritas pembangunan yang dilaksanakan pemerintah yang diarahkan kepada peningkatan kondisi ekonomi dan sosial masyarakat pedesaan. Pada kondisi demikian dapat diharapkan adanya peningkatan taraf hidup dan kesejahteraannya. Hal ini didasarkan pada pertimbangan bahwa sebagai negara agraris, maka peningkatan perekonomian daerah pedesaan tidak hanya sebagai salah satu wujud nyata pemerataan pembangunan, tetapi peningkatan perekonomian desa akan membantu ekonomi nasional secara keseluruhan. Dalam hal ini penyediaan tenaga listrik di pedesaan merupakan salah satu sarana yang akan mempercepat upaya peningkatan kesejahteraan bangsa secara keseluruhan. Oleh sebab itu, perlu diupayakan pengembangan dan pemanfaatan sumber energi baru dan terbarukan (*renewable energy*) dengan tetap berpegang pada prinsip

menguntungkan secara ekonomis, layak secara teknis, diterima secara sosial budaya, dan tidak menyebabkan kerusakan lingkungan.

Frekuensi dan tegangan listrik yang dihasilkan generator mikro hidro sangat dipengaruhi oleh kecepatan putar generator. Sedangkan kecepatan putar generator dipengaruhi oleh beban. Pada malam hari (diatas pukul 23.00), sembilan puluh persen rumah mematikan lampu, maka beban mikro hidro menjadi turun. Hal ini akan mengakibatkan roda gerak berputar lebih cepat. Akibatnya frekuensi listrik akan naik dan bila terlalu tinggi akan merusak alat-alat elektronik yang digunakan di rumah-rumah. Oleh karena itu, pengendalian frekuensi agar selalu berada pada daerah kerja antara 49 Hz – 51 Hz sangat diperlukan. Mekanisme pengontrolan dilakukan secara otomatis yaitu dengan mengatur posisi bukaan gate sehingga aliran air yang masuk dapat disesuaikan dengan beban, ataupun menyesuaikan daya beban pada sistem dengan pembangkitan untuk peredaman osilasi frekuensi yang terjadi. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah teknologi untuk mengoptimalkan kinerja dari unit pembangkit mikro hidro, yaitu dengan mengaplikasikan *Load Frequency Control* (LFC). Mekanisme LFC ini dirancang dengan menggunakan *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES), yang memiliki kemampuan untuk memberikan kompensasi daya agar dapat mengurangi atau bahkan menghilangkan osilasi frekuensi yang diakibatkan oleh terjadinya perubahan beban daya listrik dari pelanggan. SMES menyediakan sistem penyimpanan energi yang dapat beroperasi secara cepat dan otomatis.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah bagaimana cara untuk menentukan pengaturan yang paling optimal untuk parameter-parameter *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) yang terpasang sebagai pengontrol frekuensi, dengan menggunakan metode *Firefly Algorithm* (FA). Pada tugas akhir ini dibatasi pengujian pada sebuah sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro.

1.3 Tujuan

Pembahasan dalam tugas akhir ini bertujuan untuk mengaplikasikan *Firefly Algorithm* dalam penalaan parameter-parameter kendali *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES). SMES ini dipasang pada sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH) sebagai *Load Frequency Control*. Perancangan Pengendalian ini dibuat agar sistem PLTMH dapat menghasilkan frekuensi daya yang

lebih cepat dalam mencapai kestabilan. Dengan demikian, pembangkit listrik mikro hidro dapat bekerja lebih efektif dan efisien.

1.4 Metodologi

Dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, metode yang digunakan dalam menjawab permasalahan yang akan diselesaikan adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur
Pada tahap studi literatur, dilakukan pencarian data-data dari paper, jurnal ilmiah, artikel, dan sumber lainnya. Studi yang dilakukan dengan mempelajari tentang Pembangkit Listrik Mikro hidro, Controller PID SMES, dan *Firefly Algorithm*
2. Pemodelan Sistem
Pada tahap pemodelan sistem, dilakukan pemodelan dalam bentuk linier dari keseluruhan sistem pembangkit listrik mikro hidro yang diteliti menggunakan software MATLAB-SIMULINK. Pada tahap ini, juga dirancang sebuah mekanisme yang mampu bekerja secara otomatis dan cepat dalam mengontrol frekuensi generator mengikuti tinggi rendahnya nilai beban yang terpasang.
3. Perancangan Algoritma Program dan Simulasi
Pada tahap perancangan algoritma program, akan dirancang program *Firefly Algorithm* (FA), yang akan digunakan untuk mengoptimisasi dari parameter-parameter *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES). Sedangkan pada tahap simulasi, dilakukan proses simulasi dari pemodelan sistem yang telah dirancang dengan menggunakan software MATLAB-SIMULINK.
4. Analisis Data dan Perbandingan
Pada tahap analisis data dan perbandingan, dibandingkan pengaruh sistem kontrol yang dirancang terhadap kestabilan sistem pembangkit listrik mikro hidro. Jika diperoleh perubahan respon frekuensi yang lebih stabil, maka penelitian ini dapat dilanjutkan dengan menggunakan metode yang telah diajukan (*Firefly Algorithm*). Sedangkan jika hasil yang diperoleh tidak menunjukkan perbedaan, maka penelitian ini harus diulang kembali ke tahap pemodelan, dengan tujuan

dilakukan modifikasi sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro lagi sehingga diperoleh kondisi yang diharapkan.

5. Kesimpulan

Pada tahap pengambilan kesimpulan, diperoleh hasil dari penelitian yang telah dilakukan. Apakah dengan dilakukan penelitian ini diperoleh respon frekuensi sistem yang stabil atau tidak, ketika menghadapi perubahan beban daya listrik dari pelanggan.

6. Penulisan Buku Tugas Akhir

Sebagai tahap akhir dari proses penelitian, maka penulis membuat sebuah laporan tertulis berupa hasil analisis dari permasalahan dalam bentuk buku tugas akhir.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab akan terurai sebagai berikut:

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang membahas tentang latar belakang, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, serta relevansi.
2. BAB 2 menjelaskan landasan teori yang membahas tentang pembangkit listrik mikro hidro, SMES, dan *Firefly Algorithm*.
3. BAB 3 berisi tentang rancangan sistem pembangkit listrik mikro hidro yang dimodelkan beserta SMES-nya agar dapat disimulasikan menggunakan program komputer MATLAB-SIMULINK.
4. BAB 4 berisi tentang simulasi dan hasil percobaan yang telah dilakukan.
5. BAB 5 berisi kesimpulan dan saran-saran.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan menjadi solusi dalam menghadapi permasalahan osilasi frekuensi yang merupakan akibat dari perubahan beban dari konsumen. Selain itu, dapat dijadikan referensi untuk perancangan sistem pengaturan frekuensi yang lebih kompleks.

BAB 2

TEORI PENUNJANG

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban listrik dengan pembangkitan generator merupakan salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik pada setiap saat akan selalu terjadi perubahan kapasitas maupun letak beban dalam sistem. Perubahan tersebut mengharuskan setiap pembangkit menyesuaikan daya keluarannya melalui kendali governor maupun eksitasi mengikuti perubahan beban sistem. Jika hal ini tidak dilakukan, maka akan menyebabkan keseimbangan daya dalam sistem terganggu dan efisiensi pengoperasian sistem menurun menyebabkan kinerja sistem memburuk.

Kestabilan sistem tenaga adalah kemampuan dari sebuah sistem tenaga untuk kembali pada kondisi operasi setimbang atau stabil setelah mengalami gangguan, dengan sebagian besar variable dibatasi sehingga sistem tidak berubah [1]. Kenyataan yang ada di lapangan, sistem tenaga listrik beroperasi pada kondisi yang bervariasi, dapat diakibatkan oleh perubahan daya *output* generator, perubahan beban, dan kondisi sistem transmisi serta hal-hal lain yang berubah secara terus menerus.

Ketika terjadi gangguan, dalam waktu singkat akan terjadi perbedaan yang besar antara daya input mekanis pada *prime mover* dengan daya output elektrik dari generator. Kelebihan daya input mekanis pada *prime mover*, dapat menyebabkan terjadinya percepatan putaran pada rotor generator, begitupula sebaliknya. Apabila daya input mekanis pada *prime mover* tidak mampu mengimbangi perubahan beban serta rerugi sistem dengan cepat, maka kecepatan putar rotor pada generator pembangkit dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal terutama jika terjadi gangguan. Apabila gangguan tersebut tidak segera dihilangkan, maka percepatan (*acceleration*) dan perlambatan (*deceleration*) putaran rotor generator akan mengakibatkan sistem tidak mampu kembali ke kondisi stabil yang semula.

Kecepatan pembangkit memberi reaksi terhadap perubahan yang terjadi dalam sistem menjadi faktor penentu kestabilan sistem. Kestabilan mesin pembangkit sangat tergantung pada kemampuan sistem kendalinya. Sistem kendali yang andal jika mampu

mengendalikan mesin tetap beroperasi normal mengikuti perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem. Jika semua mesin tetap beroperasi dalam kondisi normal meskipun ada gangguan, maka sistem tersebut akan benar-benar stabil.

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi tiga tipe berdasarkan sifat dan besarnya gangguan yang terjadi pada sistem, yaitu:

1. Stabilitas tetap (*steady state stability*)

Stabilitas *steady-state* dapat didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap menjaga sinkronisasi diantara mesin dalam sistem dan saluran external apabila terjadi perubahan beban baik secara normal ataupun lambat meskipun telah mengalami osilasi.

2. Stabilitas peralihan (*transient stability*)

Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan atau beban besar hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus semacam itu stabilitas transient harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap kejutan (*shock*) atau perubahan beban yang relatif besar yang terjadi. Stabilitas transien adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron (sebelum terjadi aksi dari kontrol governor) yang mengikuti gangguan pada sistem. Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba-tiba, keseimbangan antara energi input dan output listrik pada sistem akan hilang. Jika energi input tidak lagi mencukupi, inersia rotor mesin yang masih bekerja, pada periode yang singkat, akan melambat. Apabila beban hilang maka energi input pada sistem akan melebihi beban listrik, dan mesin akan bergerak semakin cepat.

3. Stabilitas sub-peralihan (*dynamic stability*)

Beberapa waktu setelah gangguan, governor pada prime mover akan bereaksi untuk menaikkan atau menurunkan energi input, sesuai kondisi yang terjadi, untuk mengembalikan keseimbangan antara energi input dan beban listrik yang ada. Hal ini biasanya terjadi sekitar satu hingga satu setengah detik setelah terjadi gangguan. Periode ketika governor mulai bereaksi dan waktu ketika kestabilan mencapai kondisi *steady-state* adalah periode ketika karakteristik kestabilan dinamik mulai efektif. Stabilitas dinamis adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi yang

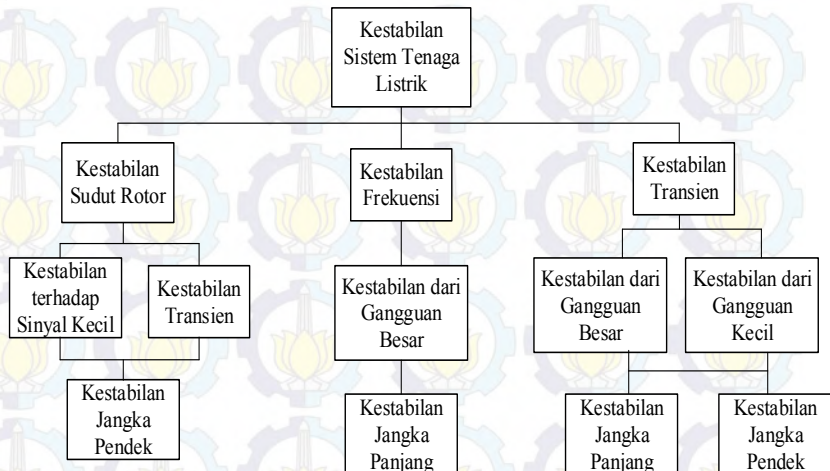
sinkron setelah terjadi ayunan pertama (periode stabilitas transien) hingga sistem mencapai kondisi equilibrium steady-state yang baru.

2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

Ada banyak faktor yang dapat mempengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik masih mampu bertahan pada kondisi stabil ketika mengalami gangguan yang besar namun sebaliknya, sistem tidak mampu bertahan pada kondisi stabil ketika mengalami gangguan yang lain. Oleh karena itu, untuk mempermudah dalam melakukan analisis, diperlukan sebuah pengklasifikasian kestabilan sistem tenaga listrik itu sendiri. Kestabilan sistem tenaga listrik dapat dikategorikan sebagai berikut menurut referensi [1] :

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan Tegangan
3. Kestabilan Frekuensi

Gambar 2.1 merupakan bagan dari klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik yang dapat memberikan penjelasan tentang masalah stabilitas sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Gambar 2.1 juga dapat membantu mengidentifikasi beberapa subkategori dari masalah stabilitas tersebut.



Gambar 2.1 klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik [1]

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor berkaitan dengan kemampuan generator sinkron yang saling terinterkoneksi untuk tetap menjaga kestabilan dalam kondisi normal dan setelah mengalami gangguan. Kestabilan sudut rotor bergantung pada kemampuan untuk menjaga dan mengembalikan keseimbangan antara torka mekanis dan torka elektrik dari masing-masing mesin sinkron yang terdapat pada sistem pembangkit listrik. Perubahan torka elektrik pada generator sinkron yang mengalami gangguan, dapat dibagi menjadi dua komponen, yaitu :

1. Komponen torka sinkronisasi, dalam fasa dengan gangguan sudut rotor
2. Komponen torka peredam, dalam fasa dengan deviasi kecepatan.

Kestabilan sistem pembangkit listrik bergantung pada kedua komponen torka tersebut untuk masing-masing generator sinkron. Kurangnya torka sinkronisasi, akan menyebabkan sistem tidak stabil tanpa terjadi osilasi, sebaliknya kekurangan torka peredam akan menghasilkan ketidakstabilan yang disertai dengan terjadinya osilasi. Karakteristik kestabilan sudut rotor dapat dibagi menjadi dua subkategori untuk memudahkan analisis, yaitu :

1. Gangguan kecil atau sinyal stabilitas kecil
Berkaitan dengan kemampuan sistem untuk menjaga sinkronisasinya saat mengalami gangguan kecil dan dapat diselesaikan dengan persamaan linear untuk tujuan analisis. Gangguan tersebut sering ditemui dalam operasi sistem normal, seperti perubahan beban.
2. Gangguan besar stabilitas sudut rotor
Berkaitan dengan kemampuan dari sistem untuk menjaga sinkronisasinya saat mengalami gangguan besar atau gangguan transien, misalnya terjadi hubung singkat pada saluran transmisi. Respon sistem dipengaruhi oleh hubungan sudut daya yang tidak linier. Periode waktu yang digunakan untuk studi kestabilan transien biasanya berlangsung antara 3 sampai 5 detik setelah terjadinya gangguan. Untuk sistem interkoneksi yang sangat besar, biasanya ditambahkan 10 sampai 20 detik [1]

2.2.2 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan dalam rentang yang diizinkan

pada kondisi operasi normal maupun setelah mengalami gangguan. Sistem memasuki keadaan ketidakstabilan tegangan saat gangguan, peningkatan permintaan beban atau perubahan kondisi sistem menyebabkan perubahan progresif dan *drop* tegangan yang tak terkendali. Faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan sistem listrik untuk memenuhi permintaan daya reaktif. Pokok masalah biasanya drop tegangan yang terjadi ketika daya aktif dan aliran daya reaktif melalui reaktansi induktif terkait dengan jaringan transmisi.

Kriteria untuk ketidakstabilan tegangan adalah bahwa pada kondisi operasi yang diberikan untuk setiap bus dalam sistem, besarnya tegangan bus meningkat ketika diberikan injeksi peningkatan daya reaktif pada bus yang sama. Sebuah sistem tegangan tidak stabil jika untuk setidaknya satu bus dalam sistem, besaran tegangan bus (V) menurun ketika injeksi daya reaktif (Q) di bus yang sama meningkat. Dengan kata lain, sebuah sistem memiliki tegangan yang tidak stabil jika sensitivitas VQ negatif untuk setidaknya satu bus. Hubungan antara daya aktif (P) dan tegangan (V) juga merupakan hal penting bagi stabilitas tegangan. Sehingga pada kesimpulannya, kestabilan tegangan sangat bergantung pada hubungan antara daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan tegangan bus (V).

Ketidakstabilan tegangan pada dasarnya adalah sebuah fenomena lokal. Konsekuensinya mungkin memiliki dampak yang luas. Jatuhnya tegangan lebih kompleks daripada ketidakstabilan tegangan sederhana yang mengarah ke profil tegangan rendah di bagian penting dari sistem tenaga listrik. Adapun untuk tujuan analisis, kestabilan tegangan dapat diklasifikasikan kedalam empat kategori, yaitu:

- a). *Large-disturbance voltage stability*, mengacu pada kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan stabil menyusul gangguan besar seperti, kesalahan sistem, hilangnya pembangkitan atau kontingensi sirkuit. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik beban sistem dan interaksi kedua kontrol kontinyu dan diskrit serta proteksi. Rentang waktu analisis dari beberapa detik sampai puluhan menit. Hal ini memerlukan studi simulasi dinamis jangka panjang sistem untuk menangkap interaksi di bawah beban tap changer dan bidang pembangkit limiter arus. Jika setelah terjadi gangguan besar dan sistem control dapat

menjaga level tegangan dalam rentang yang diizinkan, maka sistem dapat dikatakan stabil terhadap gangguan besar.

b). *Small-disturbance voltage stability*, berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mempertahankan tingkat yang dapat diterima dari tegangan stabil, ketika mengalami gangguan kecil seperti perubahan inkremental dalam beban sistem. Bentuk stabilitas juga dipengaruhi oleh karakteristik beban, kontrol kontinyu, dan kontrol diskrit pada suatu saat tertentu. Proses dasar dari sistem memberikan kontribusi untuk stabilitas gangguan kecil yang pada dasarnya bersifat *steady state*. Oleh karena itu, analisis statis dapat secara efektif digunakan untuk memperkirakan margin stabilitas.

c). *Short term voltage stability*, Hal ini melibatkan dinamika komponen beban yang bertindak cepat seperti motor induksi, dimana beban dikontrol secara elektronik dan biasanya dengan konverter HVDC. Masa analisis adalah di urutan beberapa detik dan analisis memerlukan solusi dari persamaan diferensial sistem yang sesuai.

d). *Long term voltage stability*, analisis tentang stabilitas tegangan jangka panjang melibatkan dinamika peralatan yang bertindak lambat seperti perubahan tap transformator, beban termostatik yang dikendalikan, dan pembatas arus generator. Masa studi dapat diperluas ke beberapa menit berikutnya, dan membutuhkan dinamika jangka panjang dari sistem simulasi.

2.2.3 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk menjaga keseimbangan frekuensi setelah terjadi gangguan. Adapun ketidakstabilan frekuensi disebabkan oleh ketidakseimbangan antara daya pembangkitan dan beban yang disuplai. Ketidakstabilan frekuensi menjadi perhatian khusus, agar tidak terdapat rugi pada beban maupun pembangkitan tenaga listrik. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1, kestabilan frekuensi dapat berupa kestabilan jangka panjang maupun jangka pendek. Contoh ketidakstabilan frekuensi jangka pendek antara lain pembangkit yang bekerja secara *standalone* kemudian mengalami *underfrequency*, karena pembangkit tidak mampu memenuhi beban daya listrik total, sehingga terjadi pemadaman dalam beberapa detik di sisi pelanggan. Sedangkan pada situasi yang lebih kompleks, ketidakstabilan frekuensi disebabkan

oleh *overspeed control* turbin, atau proteksi dan pengaturan dari *reactor/boiler* yang mengakibatkan sistem terganggu selama puluhan detik hingga beberapa menit merupakan contoh ketidakstabilan frekuensi jangka panjang [1].

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro

Mikro hidro adalah sebuah istilah yang digunakan untuk unit instalasi pembangkit listrik yang menggunakan energi air dalam skala kecil. Pembangkit listrik mikro hidro termasuk sumber energi terbarukan dan layak disebut *clean energy* karena ramah lingkungan. Dari segi teknologi, pembangkit listrik mikro hidro dipilih karena konstruksinya sederhana, mudah dioperasikan, serta mudah dalam perawatan dan penyediaan suku cadang. Adapun daya output yang dihasilkan dari pembangkit listrik mikro hidro tidak lebih dari 100 *kilowatt*.

Secara ekonomi, biaya operasi dan perawatannya relatif murah, sedangkan biaya investasinya cukup bersaing dengan pembangkit listrik lainnya. Ditinjau dari aspek sosial, pembangkit listrik mikro hidro mudah diterima masyarakat luas, apalagi jika dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga nuklir sebagai sumber energi terbarukan. Pembangkit listrik mikro hidro sering dibuat dalam skala desa di daerah-daerah terpencil yang belum mendapatkan listrik dari grid PLN. Tenaga air yang digunakan dapat berupa aliran air pada sistem irigasi, sungai yang dibendung, ataupun air terjun.

Pembangkit listrik mikro hidro pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian dan jumlah debit air per detik yang ada pada aliran air saluran irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi ini selanjutnya menggerakkan generator dan menghasilkan listrik. Lokasi pembangkit listrik mikro hidro yang paling baik adalah lokasi yang memiliki sumber air yang debit airnya selalu mengalir sepanjang tahun. Secara teori, nilai daya listrik yang dapat dihasilkan oleh pembangkit P_{th} sangat bergantung pada nilai debit air yang melewati pipa pesat Q dan juga tinggi terjun air H . Persamaannya sebagai berikut :

$$P_{th} [W] = Q[m^3/s] \times H[m] \times k[N/kg] \quad (2.1)$$

Adanya efisiensi dari turbin η_{turbin} dan efisiensi generator η_{gen} yang ditentukan oleh masing-masing pabrik dengan nilai di sekitar 0.85 menyebabkan nilai daya listrik nyata P_{real} yang terhasikan akan lebih rendah dibandingkan dengan P_{th} .

$$P_{\text{real}} [\text{W}] = Q[\text{m}^3/\text{s}] \times H[\text{m}] \times k[\text{N/kg}] \times \eta_{\text{turbin}} \times \eta_{\text{gen}} \quad (2.2)$$

Untuk pompa yang digunakan sebagai turbin, nilai efisiensinya bervariasi antara 0,6 sampai 0,8. Adapun untuk *cross-flow turbines*, nilainya bervariasi antara 0,5 sampai 0,7.

2.3.1 Turbin Air

Dalam suatu sistem pembangkit listrik mikro hidro dan pembangkit tenaga air pada umumnya, turbin air merupakan salah satu peralatan utama selain generator. Turbin air adalah alat untuk mengubah energi potensial air menjadi energi puntir mekanis. Energi puntir ini kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Turbin air dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa cara, namun yang paling utama adalah klasifikasi turbin air berdasarkan cara turbin air tersebut merubah energi air menjadi energi puntir. Berdasarkan klasifikasi ini, maka turbin air dibagi menjadi dua yaitu :

- a) Turbin impuls, yaitu turbin air yang cara bekerjanya dengan merubah seluruh energi air (yang terdiri dari energi potensial, tekanan, kecepatan) yang tersedia menjadi energi kinetik untuk memutar turbin, sehingga menghasilkan energi puntir. Contoh: turbin Pelton.
- b) Turbin reaksi, yaitu turbin air yang cara bekerjanya dengan merubah seluruh energi air yang tersedia menjadi energi puntir. Turbin air reaksi dibagi menjadi dua jenis yaitu:

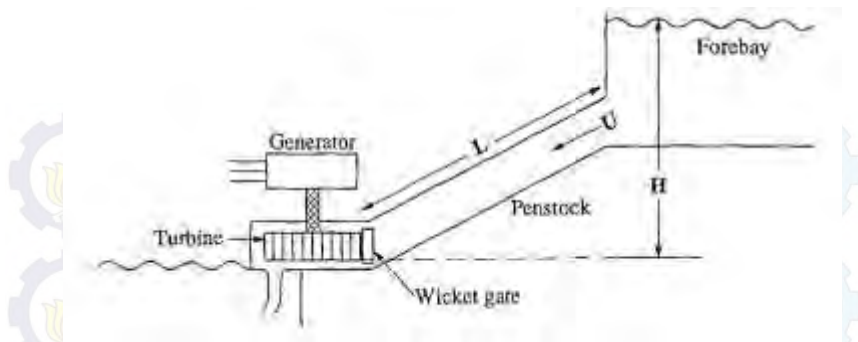
1. Francis, contoh : turbin Francis

2. Propeller :

- a) *fixed blade*, turbin jenis ini merupakan turbin generasi pertama dari jenis ini. Karena sudu tidak dapat diatur, maka efisiensinya berkurang jika digunakan pada kisaran debit yang lebar. Oleh karena itu dikembangkan jenis dengan sudu yang dapat diatur agar efisiensi tetap tinggi walaupun kisaran debitnya lebar.

- b) *adjustable blade*, contohnya Kaplan, Nagler, Bulb, Moody.

Representasi dari turbin air dalam studi kestabilan biasanya mengasumsikan bahwa penstock tidak elastis, air tampungan pampat, dan resistensi hidrolik diabaikan.



Gambar 2.2 Skema turbin pada pembangkit listrik tenaga hidro

Karakteristik turbin dan penstock ditentukan oleh tiga persamaan dasar yang berhubungan dengan hal-hal berikut :

- Kecepatan air dalam penstock
- Tenaga mekanis dari turbin
- Percepatan kolom air

Persamaan kecepatan air dalam penstock dapat dituliskan dengan,

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (2.3)$$

dengan

U = kecepatan air

G = posisi gate

H = Ketinggian jatuh air (head)

K_u = konstanta proporsionalitas

Adapun tenaga mekanis dari turbin sebanding dengan tekanan dan aliran air, maka

$$P_m = K_p H U \quad (2.4)$$

Percepatan kolom air yang disebabkan oleh perubahan di *head* turbin, ditandai dengan hukum kedua Newton tentang gerak, dapat dinyatakan sebagai

$$(\rho L A) \frac{d\Delta U}{dt} = -A(\rho a_g) \Delta H \quad (2.5)$$

dengan

- L = panjang saluran
- A = luas penampang pipa
- ρ = kerapatan massa
- a_g = percepatan disebabkan gravitasi
- ρLA = massa air dalam saluran
- $\rho a_g \Delta H$ = perubahan tambahan pada tekanan di gate turbin

Untuk perpindahan kecil (awalan Δ) tentang titik operasi awal (subskrip "0") dapat ditunjukkan bahwa

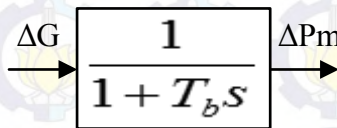
$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - T_w S}{1 + \frac{1}{2} T_w S} \quad (2.6)$$

dengan

$$T_w = \frac{LU_0}{a_g H_0} \quad (2.7)$$

T_w direferensikan sebagai *water starting time*. Yang merupakan representasi dari waktu yang dibutuhkan head gate H_0 untuk mempercepat pergerakan air dalam penstock dari keadaan diam menuju kecepatan U_0 . perlu diperhatikan bahwa T_w bervariasi tergantung beban. Khususnya T_w pada keadaan beban penuh berada dalam rentang 0,5 detik dan 4,0 detik.

Adapun persamaan 2.6 merepresentasikan transfer function klasik untuk sistem turbin-penstock. Hal ini menunjukkan bagaimana perubahan output daya turbin dalam menanggapi perubahan bukaan gate untuk turbin ideal tanpa rugi. Sehingga diagram blok yang digunakan pada simulasi tugas akhir ini seperti berikut.



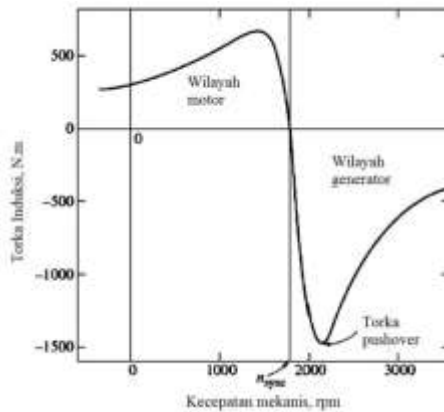
Gambar 2.3 Diagram blok turbin air

2.3.2 Generator Induksi

Generator induksi merupakan salah satu jenis generator dengan arus bolak-balik (AC) yang menerapkan prinsip motor induksi untuk menghasilkan daya. Generator induksi dioperasikan dengan menggerakkan rotornya secara mekanis lebih cepat daripada kecepatan sinkron sehingga menghasilkan slip yang negatif. Motor induksi umumnya dapat digunakan sebagai sebuah generator tanpa adanya modifikasi internal. Generator induksi sangat berguna pada aplikasi-aplikasi seperti pembangkit listrik mikro hidro, turbin angin, atau untuk menurunkan aliran gas bertekanan tinggi ke tekanan rendah, karena dapat memanfaatkan energi dengan pengontrolan yang relatif sederhana.

Dalam pengoperasiannya, generator induksi harus dieksitasi menggunakan tegangan yang leading. Ini biasanya dilakukan dengan menghubungkan generator kepada sistem tenaga eksisting. Pada generator induksi yang beroperasi *standalone*, bank kapasitor harus digunakan untuk mensuplai daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator induksi. daya reaktif yang diberikan harus sama atau lebih besar daripada daya reaktif yang diambil mesin ketika beroperasi sebagai motor. Tegangan terminal generator akan bertambah dengan penambahan kapasitansi.

Karakteristik torka-kecepatan mesin induksi seperti kurva pada Gambar 2.3, memperlihatkan bahwa jika motor induksi diputar pada kecepatan yang lebih tinggi daripada *nsync* oleh sebuah penggerak mula (prime mover) eksternal, arah torka induksinya akan berbalik dan motor akan berlaku sebagai sebuah generator. Dengan bertambahnya torka yang diberikan penggerak mula kepada porosnya, besar daya yang dihasilkan oleh generator induksi ikut bertambah. Seperti diperlihatkan gambar, terdapat nilai torka induksi maksimum yang mungkin pada mode operasi generator. Torka ini disebut dengan torka *pushover* generator. Jika torka yang diberikan penggerak mula kepada poros melebihi torka *pushover*, maka pada generator akan terjadi *overspeed*.

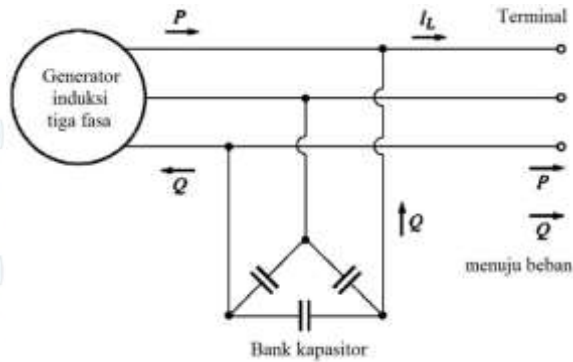


Gambar 2.4 Karakteristik torka-kecepatan pada motor induksi, memperlihatkan wilayah operasi generator dan torka pushover.

Keuntungan dari generator induksi adalah kesederhanaan konstruksi dan rangkaian aplikasinya. Sebuah generator induksi tidak memerlukan rangkaian medan terpisah dan tidak harus diputar secara terus-menerus pada kecepatan tetap. Selama putaran mesin masih lebih tinggi daripada n_{sync} dari sistem tenaga yang terhubung padanya, mesin akan tetap berfungsi sebagai generator. Semakin besar torka diberikan kepada porosnya (sampai nilai tertentu), maka akan semakin besar daya output yang dihasilkan.

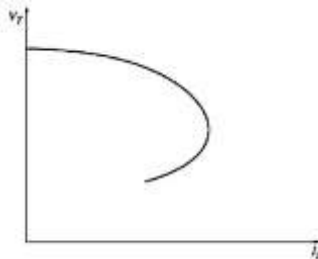
Fakta bahwa tidak ada pengaturan rumit yang diperlukan membuat generator induksi menjadi pilihan yang tepat untuk mikro hidro, kincir angin, sistem pemanfaatan panas, dan sumber-sumber daya tambahan serupa yang ditambahkan kepada sistem tenaga eksisting. Pada aplikasi-aplikasi seperti itu, perbaikan faktor daya dapat dihasilkan oleh kapasitor dan tegangan terminal generator induksi dapat dikontrol sistem tenaga eksternal.

Generator induksi juga dimungkinkan untuk beroperasi sebagai generator *standalone*, yang tidak terhubung kepada sistem tenaga manapun selama terdapat kapasitor yang dapat mensuplai daya reaktif yang dibutuhkan generator dan beban-beban yang dihubungkan. Generator isolated seperti ini diperlihatkan pada Gambar 2.4 berikut :



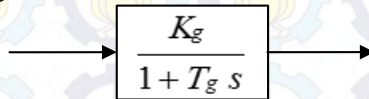
Gambar 2.5 Sebuah generator induksi beroperasi sendiri dengan kapasitor bank untuk mensuplai daya reaktif.

Permasalahan paling utama pada generator induksi adalah tegangannya yang berubah drastis ketika beban berubah, khususnya pada beban reaktif. Karakteristik terminal yang umum dari sebuah generator induksi yang bekerja sendiri dengan kapasitansi paralel konstan diperlihatkan Gambar 2.5 Pada kasus pembebanan induktif, tegangan jatuh sangat cepat. Ini terjadi karena kapasitor yang konstan harus mensuplai semua daya reaktif yang dibutuhkan baik oleh beban maupun generator, dan semua daya reaktif yang dialihkan kepada beban mengembalikan generator mendekati kurva magnetisasinya, akan menyebabkan penurunan besar pada tegangan generator. Dengan demikian sangat sulit untuk menjalankan motor induksi pada sistem tenaga yang disuplai oleh generator induksi.



Gambar 2.6 Karakteristik tegangan-arus terminal generator induksi untuk beban dengan faktor daya lagging yang konstan.

Karena sifat alami karakteristik torka-kecepatan mesin induksi, frekuensi generator induksi berubah-ubah dengan perubahan beban, tapi karena karakteristik torka-kecepatan sangat curam pada wilayah operasi normal, variasi frekuensi total biasanya dibatasi di bawah 5 persen. Harga variasi ini cukup dapat diterima pada banyak aplikasi generator isolated atau emergency. Adapun model laplace dari generator induksi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Diagram blok generator induksi

2.3.3 Governor

Fungsi utama dari sebuah governor adalah untuk mengontrol kecepatan putar turbin dan/atau beban. Fungsi kecepatan atau beban kontrol utama melibatkan umpan balik *error* kecepatan untuk mengontrol posisi gerbang. Dalam rangka untuk memastikan operasi paralel yang memuaskan dan stabil dari beberapa unit, governor kecepatan tinggi tersedia dengan karakteristik droop. Tujuan dari droop adalah untuk memastikan pembagian beban yang seimbang antar unit pembangkit. Untuk kinerja kontrol stabil, droop sementara yang besar dengan waktu *resetting* yang lama diperlukan. Hal ini dilakukan dengan penyediaan nilai umpan balik atau pengurangan kompensasi gain transient.

Berbagai komponen Governor Mekanik-hidrolik yaitu kecepatan penginderaan, umpan balik droop permanen, fungsi komputasi, katup relay, gerbang motor servo dan dashpot digunakan untuk menyediakan kompensasi droop sementara. Transfer function dari relay katup dan gate servomotor dapat dituliskan

$$\frac{g}{a} = \frac{K_1}{s} \quad (2.8)$$

Adapun transfer function dari katup pilot dan servo pilot dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$\frac{a}{b} = \frac{K_2}{1+ST_p} \quad (2.9)$$

dengan K_2 ditentukan oleh rasio umpan balik, T_p ditentukan dari area sisi kiri katup pilot dan K_2 . dari dua persamaan diatas, dapat diperoleh

$$\frac{g}{b} = \frac{K_1 K_2}{s(1+ST_p)} = \frac{K_s}{s(1+ST_p)} \quad (2.10)$$

dengan K_s merupakan gain servo dan T_p adalah konstanta waktu dari katup pilot dan motor servo.

Secara umum, sistem governor saat ini terbagi ke dalam tiga jenis. Yaitu governor konvensional, *Electronic Load Controller* (ELC), dan governor dengan motor servo. Sistem governor konvensional yang biasa digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) kurang cocok digunakan pada pembangkit listrik mikro hidro. Hal ini disebabkan mahalnya biaya instalasi governor konvensional pada pembangkit, kompleksitas yang tinggi, dan memerlukan *heavy maintenance*. Sehingga governor konvensional tidak ideal untuk digunakan pada pembangkit listrik mikro hidro yang terisolasi dan tidak terhubung ke grid.

Sistem pengaturan yang relatif murah dan banyak dipakai pada pembangkit listrik mikro hidro adalah *Electronic load controller* (ELC). Bagian utama dari sistem kontrol ini terdiri dari panel kontrol dan *ballast load*. Prinsip pengaturannya adalah menyeimbangkan antara daya yang dihasilkan oleh generator dengan beban (daya) konsumen. Pada saat beban konsumen berkurang, kelebihan daya yang dihasilkan generator akan dipindahkan ke *ballast load* sehingga beban total pada generator tidak berubah. Kekurangannya, ELC banyak membuang energi yang seharusnya dapat dimanfaatkan.

Adapun sistem pengaturan lain yang cukup baik, murah dan mudah dalam perawatan yaitu menggunakan dc servomotor sebagai aktuator untuk pengaturan posisi bukaan gate (governor). Sebuah motor servo dapat dianggap sebagai motor listrik presisi yang berfungsi untuk menyebabkan gerak dalam bentuk rotasi atau gerakan linier secara proporsional dengan sinyal perintah listrik yang disediakan. Dalam rancangan tugas akhir ini, motor servo yang digunakan adalah tipe Zero. Sebuah sistem kontrol umpan balik dari Type Zero sering disebut

sebagai sistem regulator. Sistem seperti ini dirancang terutama untuk menjaga variabel yang dikendalikan pada nilai konstan yang diinginkan meskipun terjadi gangguan. Servo motor lebih disukai untuk mengontrol sistem listrik tenaga air kecil karena memiliki desain yang sederhana, membutuhkan perawatan yang tidak rumit, dan lebih murah dari governor konvensional.

2.3.4 Bagian Pendukung Pembangkit Listrik Mikro Hidro

Bagian-bagian pendukung dari unit pembangkit mikro hidro, yaitu antara lain :

1. *Diversion weir* (Bendungan pengalih)
Dam pengalih berfungsi untuk mengalihkan air melalui sebuah pembuka di bagian sisi sungai ke dalam sebuah bak pengendap.
2. *Settling Basin* atau *Sand Trap* (Bak pengendap)
Bak pengendap digunakan untuk memindahkan partikel-partikel pasir dari air. Fungsi dari bak pengendap adalah sangat penting untuk melindungi komponen-komponen berikutnya dari dampak pasir.
3. *Headrace* (Saluran Pembawa)
Saluran pembawa mengikuti kontur dari sisi bukit untuk menjaga elevasi dari air yang disalurkan.
4. *Headtank* atau *Forebay* (Bak penenang)
Bak penenang berada di ujung saluran pembawa yang berfungsi untuk mencegah turbulensi air sebelum diterjunkan melalui pipa pesat.
5. *Penstock* (Pipa Pesat)
Penstock dihubungkan pada sebuah elevasi yang lebih rendah ke sebuah roda air, dikenal sebagai sebuah turbin.
6. *Power House* (Rumah tenaga listrik)
Bangunan minimalis ini berfungsi sebagai pelindung bagian elektris (generator) dan juga bagian mekanis (turbin air) dari sebuah pembangkit listrik mikro hidro.
7. *Tailrace* (Saluran pembuang)
Saluran ini berfungsi untuk mengembalikan air yang telah memutar turbin ke sungai. [6]



Gambar 2.8 Tampilan umum pembangkit listrik mikro hidro

Dapat dilihat dari gambar 2.9 penampakan umum pembangkit listrik mikro hidro, mulai dari sisi *intake*, *sand trap*, *head race*, *forebay*, *penstock*, *power house*, hingga ke bagian terakhir *tailrace*.

2.4 Load Frequency Control (LFC)

Frekuensi merupakan sebuah parameter umum yang terdapat pada seluruh sistem tenaga listrik. Perubahan permintaan (demand) terhadap listrik pada satu titik apabila tidak diimbangi dengan penyesuaian pada sisi pembangkitan maka dapat mengakibatkan terjadinya perubahan frekuensi. Oleh sebab itu, perlu disediakan alokasi pada generator untuk mengantisipasi perubahan beban dari konsumen. Secara umum, tiap generator pembangkit yang terpasang telah memiliki perangkat untuk mengatur osilasi frekuensi yang diakibatkan oleh bervariasinya beban dari konsumen, yaitu governor. Namun dalam beberapa kasus, kinerja dari governor tersebut belum mampu bekerja secara optimal dan cepat. Sementara itu, tujuan dari pengaturan frekuensi adalah sebagai berikut:

1. Memberikan keseimbangan (*balance*) antara sistem pembangkitan dengan beban dari konsumen
2. Memperkecil penyimpangan frekuensi akibat adanya perubahan beban yang terjadi secara tiba-tiba supaya nilai penyimpangan tersebut dapat mendekati nol (hilang)

3. Menjaga kontinuitas penyaluran daya pada pembangkit-pembangkit yang terinterkoneksi (jika ada) agar dapat berada pada kemampuan kapasitas masing-masing generator terpasang.

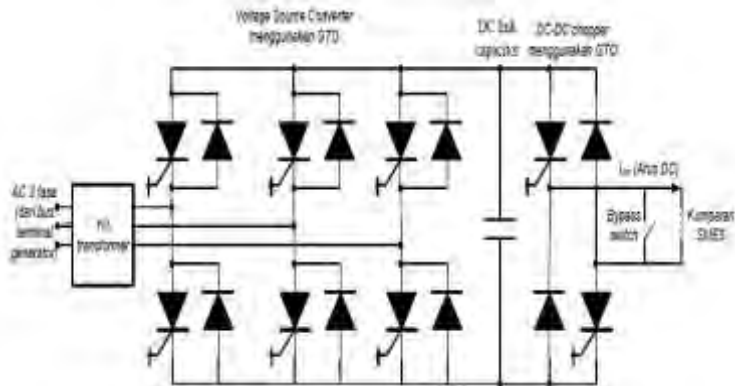
Load Frequency Control (LFC) adalah sebuah mekanisme yang digunakan untuk menjaga keseimbangan antar daya yang dihasilkan dari pembangkit listrik dengan daya yang dibutuhkan oleh pelanggan. *LFC* merupakan salah satu aspek yang sangat penting dalam pengoperasian sistem tenaga listrik dan juga sistem control, demi terciptanya penyediaan daya yang handal dan memiliki kualitas baik. Sifat dan karakteristik perubahan beban menyebabkan titik operasi dari sebuah sistem tenaga dapat berubah secara signifikan dalam penggunaan harian. Dampaknya, sistem control yang dapat bekerja optimal pada suatu kondisi operasi, belum tentu cocok digunakan dalam kondisi yang lain [7].

2.5 Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

SMES merupakan sebuah peralatan untuk menyimpan dan melepaskan daya dalam jumlah yang besar secara simultan. SMES menyimpan energi dalam medan magnet yang dibuat oleh arus DC pada kumparan superkonduktor yang didinginkan dengan cara *cryogenic*. Sistem SMES telah digunakan beberapa tahun untuk memperbaiki *power quality* industri dan untuk menyediakan pelayanan yang baik untuk pelanggan yang mengalami fluktuasi tegangan. Pengisian ulang SMES dapat dilakukan hanya dalam hitungan menit dan dapat mengulangi proses *charge* dan *discharge* ribuan kali tanpa mengurangi magnet. Waktu pengisian ulang dapat dipercepat untuk memenuhi kebutuhan khusus, tergantung pada kapasitas sistem.

SMES pertama kali ditemukan oleh Ferrier pada tahun 1969, orang yang pertama kali mengusulkan konstruksi kumparan toroida yang mampu menyuplai penyimpanan harian dari energi listrik di seluruh Perancis. Namun biaya pembuatan terlalu mahal sehingga ide tersebut tidak dipenuhi. Pada tahun 1971 peneliti di Universitas Wisconsin US memulai untuk mendalami hubungan dasar antara unit penyimpanan energi dengan sistem kelistrikan yang melewati jembatan multifasa. Hal inilah yang memelopori pertama kali konstruksi dari peralatan SMES [7].

SMES pada sistem tenaga listrik digunakan untuk mengontrol secara efektif keseimbangan daya pada generator sinkron selama periode dinamis, SMES dipasang pada bus terminal generator pada model sistem tenaga listrik. Gambar 2.11 menunjukkan konfigurasi dasar SMES.



Gambar 2.9 Konfigurasi SMES [7]

2.5.1 Konstruksi SMES

Sebuah SMES yang terhubung pada sistem tenaga listrik terdiri atas sebuah *superconducting inductor* (kumparan SMES), sistem pendingin *cyrogenic*, dan *power conditioning system* (PCS) dengan kontrol dan fungsi proteksi. *Power conditioning system* juga disebut sebagai penghubung elektronika daya dari kumparan SMES.

Kumparan SMES

SMES terdiri dari kumparan yang berkonduktansi tinggi yang dapat diperlakukan sebagai sumber arus konstan. Karena sifat alami superkonduktor, energi dapat disimpan untuk waktu yang lama tanpa kebocoran dan dapat digunakan untuk menginjeksi daya aktif pada grid kapanpun terjadi gangguan. Material yang sering digunakan untuk membuat superkonduktor adalah Niobium Titanium (NbTi). Umumnya superkonduktor yang digunakan adalah induktor 12.5 H dengan kapasitas penyimpanan 100 MJ. Sebuah kumparan SMES

dililitkan pada sebuah silinder dengan struktur *double pancake*. Kumputan SMES didesain dengan mengambil pertimbangan dari induktansi sendiri dan induktansi bersama, kapasitansi antar lilitan dan lilitan-ground yang timbul karena konstruksinya [11].

Power Conditioning System (PCS)

Pada SMES *power conditioning system* (PCS) diperlukan untuk mentransfer energi dari kumputan SMES. PCS ini terdiri dari *Voltage Source Converter* (VSC) atau inverter sumber tegangan yang terdiri atas AC to DC converter, DC *link capacitor*, dan DC to DC chopper. DC-DC chopper digunakan untuk menjaga arus yang melewati kumputan SMES selalu konstan dan untuk mentransfer daya menuju VSC melalui DC *link capacitor*. Kumputan SMES dengan DC-DC chopper terhubung dengan konverter melalui DC *link capacitor*. Kapasitor ini digunakan sebagai sumber DC sementara untuk voltage source converter (VSC) untuk menginjeksi daya aktif menuju sistem [11].

Sistem Pendingin Cryogenic

Sistem *cyrogenic* adalah bagian penting dari sistem SMES. Magnet superkonduktor harus dijaga pada temperatur dalam range 4-10⁰K sehingga menjadikannya superkonduktor alami dan membawa arus yang besar yang membuat medan magnetik yang kuat. Temperatur tersebut dapat dilakukan dengan helium cair. Sehingga helium cair menjadi komponen utama pada sistem *cyrogenic*. Hal ini juga dapat dilihat bahwa kumputan SMES tidak boleh *overload* karena dapat memicu kerusakan dari sistem pendinginan. Jika kumputan SMES membawa arus yang lebih besar daripada arus nominal, maka disipasi panas meningkat dan oleh karena itu harus dilakukan pemutusan [11].

2.5.2 Mode Operasi SMES

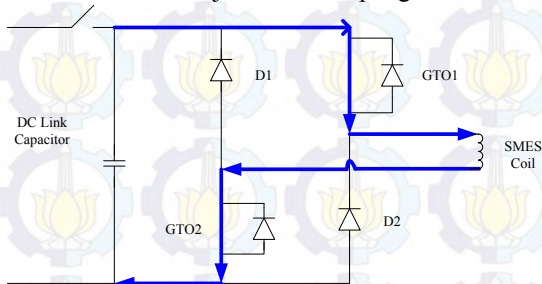
Pada SMES terdapat tiga jenis mode operasi. Mode operasi pertama adalah mode pengisian pada kumputan SMES. Mode kedua adalah mode *freewheeling*. Pada mode ini arus pada kumputan SMES bersikulasi pada loop tertutup. Mode ketiga disebut dengan mode pelepasan. Pengaturan kinerja SMES dilakukan dengan mengatur *duty cycle* dari konverter.

Mode Pengisian SMES

Pada mode charging, SMES akan diisi dengan energi sampai batas yang telah ditentukan. Hubungan antara tegangan pada kumparan SMES dengan tegangan pada DC link kapasitor adalah

$$V_{SM} = D * V_{DC} \quad (2.11)$$

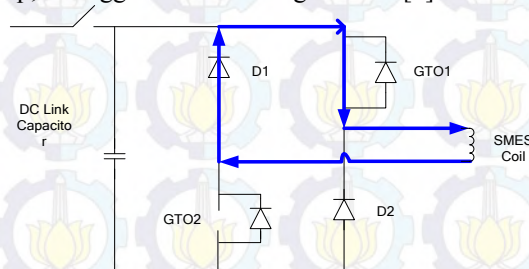
V_{sm} adalah tegangan pada kumparan SMES, adalah tegangan pada DC link kapasitor dan D merupakan *duty cycle*. *duty cycle* disini digunakan untuk menyalakan *Gate Turn Off (GTO) thyristor*. Gambar 2.12 menunjukkan mode pengisian SMES [9].



Gambar 2.10 Mode Pengisian [9]

Mode Freewheeling SMES

Pada mode ini, arus bersirkulasi pada loop tertutup yang disebut juga mode standby. Selama periode ini tidak ada losses yang signifikan, selama arus melalui kumparan SMES bersirkulasi pada loop tertutup, sehingga arus cenderung konstan [9].



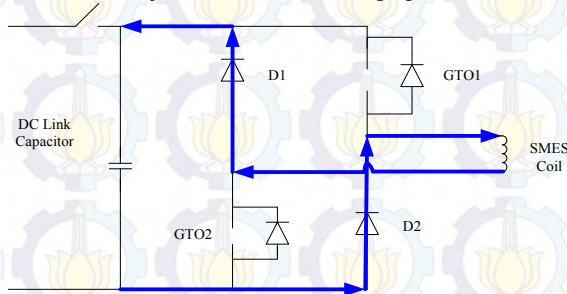
Gambar 2.11 Mode Freewheeling [9]

Mode Pelepasan SMES

Pada mode ini, arus yang berada pada kumparan SMES *discharge* menuju DC link kapasitor. Tingkat *discharge* pada kumparan SMES dapat dikontrol dengan membuat D pada salah satu GTO tidak nol. Hubungan antara kumparan SMES dengan dc link kapasitor diberikan sebagai berikut [9].

$$-V_{SM} = (1 - D) * V_{DC} \quad (2.12)$$

Gambar berikut menunjukkan mode discharge pada SMES.



Gambar 2.12 Mode Discharging [9]

2.5.3 Pemodelan SMES pada Sistem Tenaga Listrik

Untuk mengontrol secara efektif keseimbangan daya pada generator, SMES ditempatkan pada terminal bus generator. Hubungan antara arus dan tegangan pada SMES adalah

$$I_{SM} = \frac{1}{L_{SM}} \int_{t_0}^t V_{SM} d\tau + I_{SM0} \quad (2.13)$$

I_{SM0} adalah arus awal induktor. Daya yang disimpan atau dikirimkan oleh SMES adalah

$$P_{SM} = V_{SM} I_{SM} \quad (2.14)$$

Jika V_{SM} positif maka daya akan ditransfer dari sistem ke unit SMES. Sedangkan jika V_{SM} negatif maka daya akan dilepaskan dari unit SMES. Energi yang disimpan pada kumparan SMES sebesar

$$W_{SM} = \frac{1}{2} L_{SM} I_{SM}^2 \quad (2.15)$$

L_{SM} adalah induktansi dari SMES. Tegangan pada kumparan SMES V_{SM} dikontrol secara kontinu tergantung pada perubahan kecepatan rotor generator yaitu,

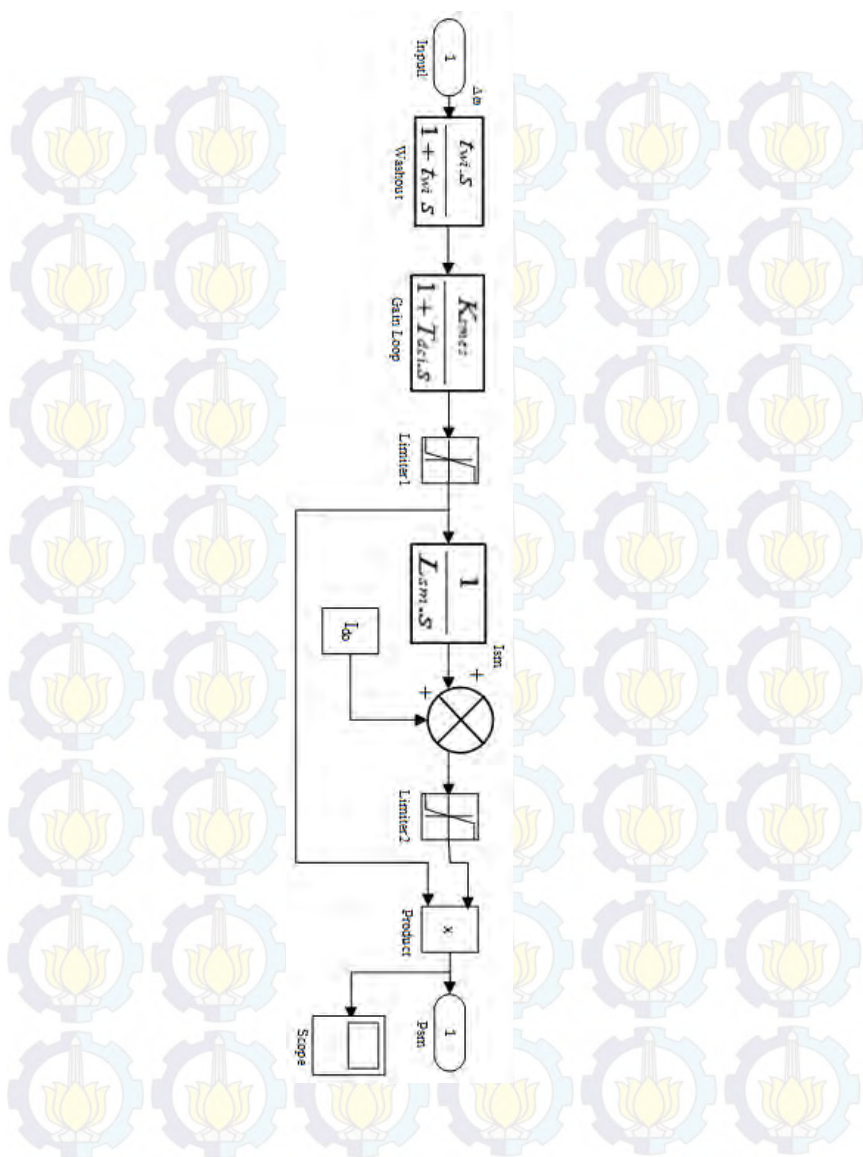
$$\Delta V_{SM} = \frac{K_{smes}}{1+sT_{dc}} \Delta \omega \quad (2.16)$$

K_{smes} adalah gain dari kontrol loop dan T_{dc} adalah konstanta time delay dari peralatan kontrol. Karena keterbatasan implementasi hardware maka arus kumparan memiliki batas maksimum dan minimum. Selama beroperasi, batas atas dari arus kumparan diatur $1,38I_{sm0}$, dan batas bawah $0,31I_{sm0}$. Batas dari tegangan terminal adalah $\pm 0,2352$ p.u [10,11]. Sehingga untuk mendapatkan sinyal daya aktif yang sesuai maka parameter yang harus ditala adalah K_{smes} , T_{dci} , t_{wi} , K_p , K_i . Dengan menala parameter ini maka akan diperoleh koordinasi SMES yang sesuai Gambar 2.14 menunjukkan pemodelan SMES dalam bentuk block diagram.

Apabila dibandingkan dengan sistem penyimpan energi lainnya seperti *battery energy storage system* (BESS), *flywheel*, *pumped hydro storage hydroelectric system*, dan *compressed air energy storage* (CAES), maka SMES memiliki efisiensi tertinggi yaitu mampu mencapai 95%. Efisiensi tinggi dari SMES didapatkan karena rugi-rugi daya yang kecil daripada sistem penyimpan energi yang lain, resistansinya hampir mendekati nol, lebih jauh lagi pada SMES tidak ada bagian yang bergerak, yang membuat SMES tidak memiliki rugi-rugi gesekan. Keuntungan lain adalah bahwa SMES memiliki tingkat discharge yang dapat dikontrol dan memiliki respon yang sangat cepat sehingga SMES dapat diaplikasikan pada daya yang besar dalam *short energy bursts*. SMES juga memiliki waktu hidup yang lama, yang membuat SMES lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan sirkulasi konstan seperti mode kontinu dari operasi. SMES juga tidak menyebabkan polusi lingkungan [17]

Selain memiliki banyak keuntungan, SMES juga memiliki beberapa kerugian.

1. SMES membutuhkan perawatan yang lebih untuk pendinginan *cryogenic*
2. Kebocoran fluks magnetik pada SMES
3. Membutuhkan biaya yang mahal untuk membangun unit SMES.

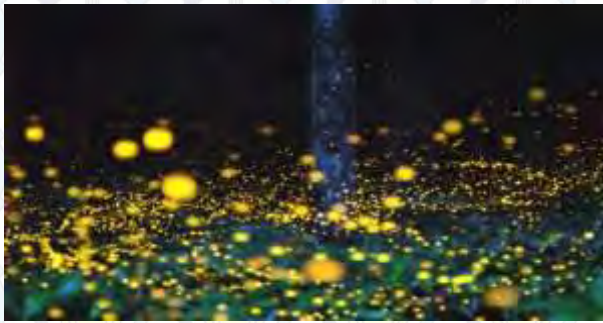


Gambar 2.13 Blok diagram SMES [11,12]

2.6 Firefly Algorithm (FA)

Firefly algorithm adalah sebuah algoritma *metaheuristik* yang terinspirasi dari perilaku berkedip kunang-kunang. Tujuan utama dari berkedipnya kunang-kunang adalah untuk menarik kunang-kunang yang lain. Algoritma ini pertama ditemukan oleh Dr. Xin-She Yang di Universitas Cambridge pada tahun 2007. Pada algoritma ini terdapat tiga perumusan dasar :

1. Semua kunang-kunang adalah unisex, jadi suatu kunang-kunang akan tertarik dengan kunang-kunang lain terlepas dari jenis kelamin mereka.
2. Daya tarik sebanding dengan kecerahan, maka kunang-kunang dengan kecerahan lebih redup akan bergerak ke arah kunang-kunang dengan kecerahan lebih terang dan kecerahan berkurang seiring dengan bertambah jarak. Apabila tidak ada kunang-kunang yang memiliki kecerahan paling cerah maka kunang-kunang akan bergerak random. Gambar 2.15 menunjukkan pergerakan kunang-kunang.



Gambar 2.14 Pergerakan kunang-kunang.

3. Tingkat kecerahan kunang-kunang dideterminasikan oleh tempat dari fungsi objektif kunang-kunang.

Ada sekitar dua ribu spesies kunang-kunang, dan sebagian besar kunang-kunang menghasilkan kedip cahaya yang pendek dan berirama. Kedip cahaya ini dihasilkan oleh proses *bioluminescence*, dan

fungsi yang benar dari sistem sinyal kedip tersebut masih diperdebatkan sampai saat ini. Dua fungsi dasar kedip cahaya tersebut adalah untuk menarik lawan jenis (komunikasi), dan untuk mekanisme peringatan perlindungan. Pola kedip, tingkat cahaya, dan lama waktu kedip mempengaruhi sinyal yang dipancarkan [8].

Intensitas cahaya pada jarak tertentu dari sumber cahaya mematuhi hukum kuadrat terbalik. Berarti, intensitas cahaya semakin mengecil dengan peningkatan jarak r . Selain itu, udara menyerap cahaya sehingga cahaya menjadi lebih lemah sejalan dengan bertambahnya jarak. Kedua faktor gabungan ini membuat sebagian besar visual kunang-kunang memiliki jarak batas. Cahaya kedip kunang-kunang dapat dirumuskan sedemikian rupa sehingga terbentuk fungsi objektif yang dioptimisasi.

Dalam proses permasalahan optimisasi, kecerahan cahaya kunang-kunang adalah sebanding untuk nilai dari fungsi tujuan. Bentuk lain dari kecerahan dapat didefinisikan pada cara yang sama untuk fungsi fitness pada algoritma genetika [8]. Berdasarkan pada ketiga peraturan ini, langkah dasar dari algoritma kunang-kunang (FA) dapat diringkas sebagai *pseudo code* berikut.

```

Fungsi objektif  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$ 
Inisialisasi populasi kunang-kunang  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Tentukan koefisien penyerapan cahaya  $\gamma$ 
while ( $t < \text{Max Generation}$ )
    for  $i = 1 : n$  semua  $n$  kunang-kunang
        for  $j = 1 : i$  semua  $n$  kunang-kunang
            Intensitas cahaya  $I_i$  pada  $x_i$  ditentukan oleh  $f(x_i)$ 
            if ( $I_j > I_i$ )
                Pindahkan kunang-kunang  $I$  menuju  $j$  pada dimensi  $d$ 
            end if
            Ketertarikan populasi dengan jarak  $r$  pada  $\exp[-\gamma r]$ 
            Evaluasi solusi baru dan perbarui intensitas cahaya
        end for  $j$ 
    end for  $i$ 
    Urutkan peringkat kunang-kunang dan cari posisi terbaik baru
end while
Tampilkan hasil [8]

```

2.6.1 Intensitas Cahaya dan Daya Tarik

Pada *firefly algorithm*, ada dua hal penting yang perlu diperhatikan, yaitu variasi intensitas cahaya dan formulasi dari daya tarik. Secara sederhana, dapat diasumsikan bahwa daya tarik dari seekor kunang-kunang ditentukan oleh intensitas kecerahan yang bergantung pada formulasi fungsi tujuan.

Pada kasus yang sederhana untuk masalah optimisasi maksimum, kecerahan I dari seekor kunang-kunang pada sebuah lokasi x tertentu dapat diformulasikan sebagai $I(x) \propto f(x)$. Adapun daya tarik β adalah relatif, itu dapat diperoleh dari penglihatan kunang-kunang lain. Daya tarik akan bervariasi dengan jarak r_{ij} antara kunang-kunang i dengan kunang-kunang j . Selain itu, intensitas cahaya akan menurun seiring peningkatan jarak kunang-kunang dari sumber cahaya, dan cahaya juga diserap oleh lingkungan sekitar. Jadi, kita dapat memvariasikan daya tarik terhadap derajat dari penyerapan γ . Parameter γ mencirikan variasi dari daya tarik, dan nilai γ sangat penting pada penentuan kecepatan konvergensi dan bagaimana perilaku algoritma FA.

Istilah ketiga adalah pengacakan dengan α sebagai parameter pengacakan, dan ϵ_i adalah sebuah vektor dari nilai-nilai acak yang diambil dari distribusi *Gaussian* atau distribusi seragam. Sebagai contoh, bentuk paling sederhana dari ϵ_i dapat dihasilkan dari random yang merupakan generator angka acak yang merata antara nilai 0 hingga 1 [8].

2.6.2 Penskalaan dan Pembatasan

Penskalaan Γ harus sesuai dengan permasalahan optimisasi. Jika Γ merupakan skala khusus untuk masalah optimisasi yang diberikan, untuk jumlah populasi kunang-kunang $n \gg k$, parameter k sendiri adalah nilai optimum lokal, sehingga posisi awal kunang-kunang sejumlah n harus didistribusikan relatif merata di seluruh ruang pencarian. Kemudian apabila iterasi dilanjutkan, kunang-kunang akan menuju ke suatu optimal lokal (termasuk yang global). Dengan membandingkan solusi terbaik di antara semua nilai optimal ini, optimal global akan tercapai. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa algoritma kunang-kunang akan mendekati optimal global ketika $n \rightarrow \infty$ dan $t \gg 1$.

Ada dua hal penting dalam pembatasan kasus pencarian kunang-kunang, yaitu ketika $\gamma \rightarrow 0$ dan $\gamma \rightarrow \infty$. Untuk $\gamma \rightarrow 0$, daya tarik konstan $\beta = \beta_0$ dan $\Gamma \rightarrow \infty$, dapat dikatakan bahwa intensitas cahaya tidak berkurang pada ruang ideal. Dengan demikian, kunang-kunang yang

berkedip dapat dilihat dengan jelas dari sudut ruang manapun. Dengan demikian, suatu nilai optimal dapat dengan mudah dicapai.

Di sisi lain, pembatasan kasus $\gamma \rightarrow \infty$ mengarah ke $\Gamma \rightarrow 0$ dan $\beta(r) \rightarrow \delta(r)$ yang berarti bahwa daya tarik hampir nol di mata kunang-kunang lainnya. Ini sama dengan kasus kunang-kunang yang berkeliaran di wilayah berkabut sangat tebal secara acak. Tidak ada kunang-kunang lain yang dapat terlihat, dan kunang-kunang menjelajah secara acak.

Pada *firefly algorithm* ini terdapat kasus antara dua kondisi ekstrim, yaitu menyesuaikan parameter γ dan α sehingga dapat mengungguli pencarian-pencarian acak yang lain. Bahkan FA dapat menemukan optimal global serta optimal lokal secara bersamaan dan efektif. Keuntungan lain dari FA adalah kunang-kunang yang berbeda akan bekerja hampir secara terpisah sehingga algoritma ini cocok untuk implementasi paralel [8].

2.7 Kriteria Routh-Hurwitz

Kriteria Routh-Hurwitz adalah sebuah prosedur analitik untuk menentukan apakah semua akar-akar persamaan karakteristik sistem terletak di sebelah kiri, sehingga dapat menentukan kestabilan sebuah sistem. Kriteria ini memberikan jumlah akar-akar persamaan karakteristik sistem yang terletak di sebelah kanan bidang s .

Kriteria Routh-Hurwitz diaplikasikan melalui beberapa tahap. Tahap awal adalah menghasilkan persamaan karakteristik yang berbentuk sebuah polinomial dari blok diagram sistem yang akan dianalisa, seperti di bawah ini:

$$PK = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (2.17)$$

Kemudian, tahap berikutnya adalah menyusun persamaan karakteristik tersebut dalam susunan matriks, yang dikenal dengan istilah Array Routh. Apabila akar-akar persamaan karakteristik dari matriks sistem tersebut semuanya bernilai sama (negatif ataupun positif semua), maka sistem dapat dikatakan stabil.

BAB 3

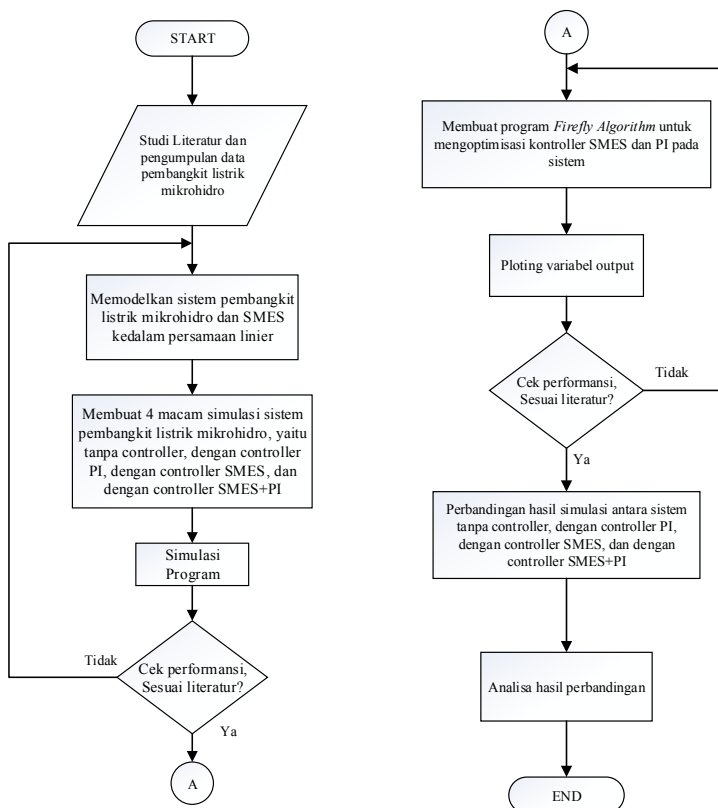
PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA

Pada Tugas Akhir ini, SMES digunakan pada sistem pembangkit listrik mikro hidro. Untuk mendapatkan koordinasi yang optimal, SMES dioptimisasi menggunakan *Firefly Algorithm* (FA). Simulasi ini bertujuan untuk menguji kinerja SMES yang parameter-parameternya telah ditala menggunakan FA yang dipasang pada sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro. Metode penyelesaian Tugas Akhir, data, dan penalaan SMES diuraikan dalam bab ini. Pengolahan data dan simulasi dikerjakan dengan menggunakan software MATLAB.

3.1 Metodologi Penelitian

Gambar 3.1 menunjukkan diagram alur penelitian Tugas akhir. Pelaksanaan penelitian dimulai dengan tahapan pengumpulan data pembangkit listrik mikro hidro dan data SMES. Setelah memperoleh data-data yang dibutuhkan, maka selanjutnya dilakukan pemodelan sistem pembangkit listrik mikro hidro beserta SMES ke dalam bentuk persamaan linier. Kemudian, dirancanglah simulasi 4 buah sistem untuk menilai benar tidaknya literatur yang telah diambil. Dapat terlihat perbedaan nilai *overshoot* dan *settling time* tergantung ada atau tidaknya controller pada keempat sistem yang telah dibuat. Pada tahapan ini pula dilakukan koordinasi nilai parameter SMES yang ingin diketahui hingga mencapai kondisi sistem yang stabil pada pembangkit listrik mikro hidro. Setelah sistem stabil dilakukan penalaan FA dengan harapan untuk mendapatkan respon yang lebih baik.

Sistem tanpa kontrol, sistem dengan control PI, sistem dengan SMES, dan sistem dengan koordinasi SMES+PI yang ditala dengan FA kemudian akan dibandingkan dengan cara melihat respon frekuensi dan juga eigen value dari masing-masing pembangkitan. Setelah diperoleh kedua parameter tersebut, maka sistem yang disimulasikan bisa dibandingkan satu sama lain. Dari hasil perbandingan dianalisis dan disimpulkan sebagai kesimpulan dalam Tugas Akhir.



Gambar 3.1 Diagram alur pelaksanaan penelitian tugas akhir

3.2 Pemodelan Sistem Secara Keseluruhan

Pada sub – bab ini, disuguhkan pemodelan sistem pembangkit mikro hidro dan SMES yang terpasang. Selain itu, juga dibahas mengenai *firefly algorithm* yang diaplikasikan sebagai metode optimisasi sistem mikro hidro.

3.2.1 Model Pembangkit Listrik Mikro Hidro

Sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro pada tugas akhir ini menggunakan sebuah generator induksi, sebuah motor servo yang dioperasikan sebagai governor, dan beberapa komponen-komponen yang dimodelkan pada simulasi menggunakan program MATLAB-SIMULINK. Gambar 3.2 berikut menunjukkan konfigurasi

Tabel 3.1 menunjukkan nilai dari parameter-parameter yang digunakan dalam system simulasi ini :

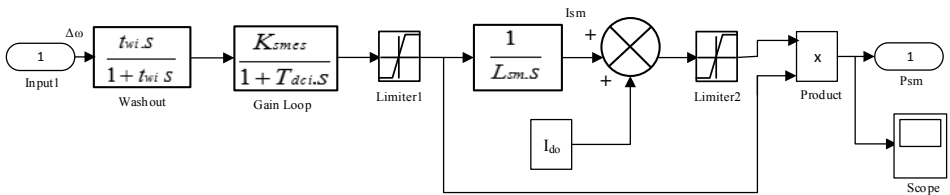
Tabel 3.1 Parameter pembangkit listrik mikro hidro

Parameter	Nilai	Keterangan
T_b	1	Respon waktu turbin air (s)
K_g	1	Penguatan pengatur generator induksi (s)
T_g	13,333	Respon waktu generator induksi (s)
$K1$	5	Konstanta penguatan <i>Error Detection</i>
$K2$	8,52	Konstanta penguatan deviasi frekuensi
$K3$	0,004	Penguatan pengatur <i>Error Detection</i>
T	0,02	Respon waktu <i>Error Detection</i>
T_s	0.1	Konstanta waktu governor (s)
K_s	2,5	Penguatan pengatur governor
S_g	40	Rating daya generator mikro hidro (kVA)
pf	0,8	Faktor daya
V_g	400/231	Tegangan nominal generator (V)
ω	1500	Kecepatan rotasi nominal (rpm)
f_g	50	Frekuensi nominal mikro hidro (Hz)

Semua nilai dari parameter-parameter yang tertera diatas didapatkan dari referensi hasil penelitian sebelumnya dan juga dari literature lain [1,4].

3.2.2 Pemodelan *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES)

Gambar 3.3 menunjukkan konfigurasi *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) yang merupakan komponen utama dari pengatur frekuensi yang diajukan untuk pembangkit listrik tenaga mikro hidro terhadap adanya perubahan beban yang dialami oleh sistem pembangkit.



Gambar 3.3 Diagram blok *controller* SMES

Parameter-parameter yang dimiliki oleh SMES tersebut yaitu mulai dari sisi input yang berupa $\Delta\omega$. Setelah itu sinyal akan masuk pada *washout* blok dimana terdapat konstanta time washout dari SMES. Kemudian dikuatkan dengan dengan konstanta penguatan SMES pada blok gain loop. Pada blok ini juga terdapat konstanta time delay T_{dc} dari peralatan control SMES. Kemudian menuju rate limiter untuk dibatasi sinyal-nya pada kondisi saturasi yang diinginkan. Selanjutnya sinyal diteruskan menuju blok transfer function induktansi SMES dimana terdapat parameter L_{sm} . Dari keluarannya berupa I_{sm} dijumlahkan dengan I_{do} menuju product keluaran. Sehingga dihasilkan output P_{sm} yang dijadikan sebagai masukan (kompensasi) pada generator selagi menunggu bagian governor bekerja. Table 3.2 menjelaskan nilai dari parameter-parameter yang terdapat dalam blok diagram SMES.

Tabel 3.2 Parameter SMES

Parameter	Nilai	Keterangan
twi	7	Konstanta time washout SMES
K_{smes}	81,3	Penguatan dari <i>control loop</i>
T_{dc}	0,02	Konstanta waktu tunda SMES
L_{sm}	1	Induktansi dari controller SMES
I_{do}	0,2018	Arus awal controller SMES

Semua nilai dari parameter-parameter yang disebut diatas didapat dari referensi hasil penelitian sebelumnya, proses *trial & error* , dan juga dari literature lain [9,10]

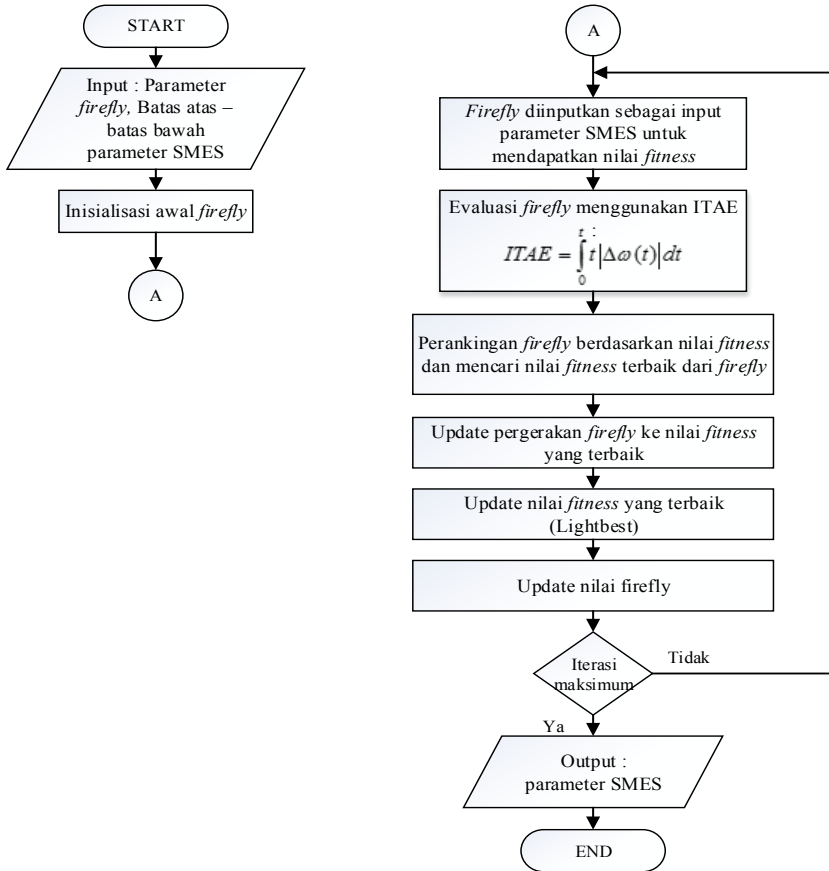
3.3 Metode *Firefly Algorithm* (FA)

Gambar 3.4 menunjukkan diagram alur algoritma metode *Firefly Algorithm* (FA) yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini. Fungsi objektif yang digunakan untuk menguji kestabilan sistem adalah dengan *Integral Time Absolut Error* (ITAE).

$$ITAE = \int_0^t t |\Delta\omega(t)| dt \quad (3.1)$$

Parameter SMES yang ditala oleh FA adalah K_{smes} , twi , T_{dc} , K_p , K_i . Adapun untuk diagram alur proses penalaan parameter SMES dengan menggunakan metode *firefly algorithm* ditunjukkan oleh

flowchart pada Gambar 3.4. Dengan melihat diagram alur, akan lebih memudahkan kita untuk mengetahui runtutan-runtutan proses yang perlu dilakukan untuk menyusun suatu sistem.

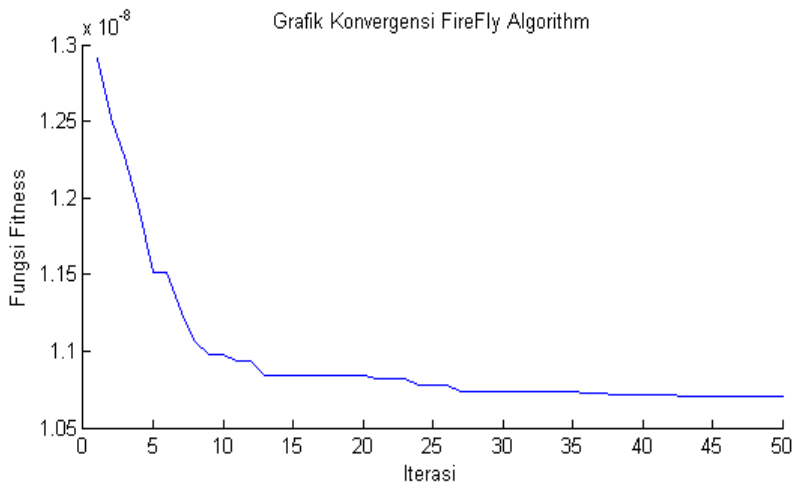


Gambar 3.4 Diagram alur metode FA [11]

Adapun data parameter-parameter FA yang digunakan ditunjukkan pada table berikut.

Tabel 3.3 Parameter FA

Parameter FA	Nilai
<i>Alpha</i>	0.25
<i>Beta</i>	0.2
<i>Gamma</i>	1
<i>Dimensi</i>	3
<i>Jumlah Kunang-Kunang</i>	50
<i>Iterasi maksimum</i>	50

**Gambar 3.5** Grafik konvergensi FA

Nilai *fitness* adalah *error* dari respon frekuensi. Optimisasi parameter SMES menggunakan FA dilakukan sebanyak 50 iterasi. Nilai minimum fungsi performansi sistem pada setiap iterasi di-*plot* pada grafik konvergensi yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. Pada Gambar 3.5 dapat dilihat algoritma FA konvergen pada iterasi ke 43 atau menemukan nilai paling optimal adalah pada iterasi ke 43. Tabel 3.4 menunjukkan nilai parameter SMES setelah ditala oleh FA. Untuk nilai

K_{smes} didapat nilai sebesar 90, nilai sebesar Tdc 0,0176, nilai sebesar tw 7,6616 dan nilai Kp serta Ki sebesar 8 dan 6,8462.

Tabel 3.4 Parameter SMES

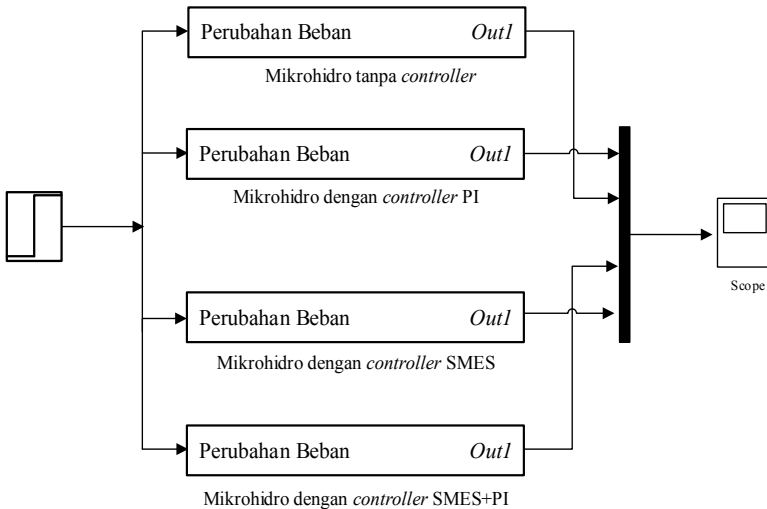
Parameter	Nilai Penalaan
K_{smes}	90
Tdc	0,0176
tw	7,6616
Kp	8
Ki	6,8462

Terdapat konstanta Kp dan Ki pada tabel diatas karena dalam simulasi awal SMES-FA ini terdapat komponen PID controller yang diletakkan sebelum blok *gain control* pada rangkaian SMES, sehingga total ada lima konstanta yang dicari dengan iterasi FA.

3.4 Simulasi Sistem

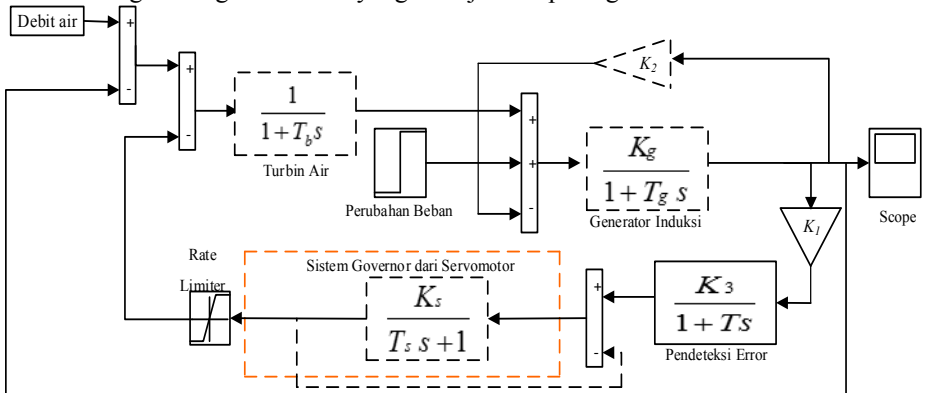
Simulasi sistem bertujuan untuk mengetahui perbandingan hasil mana yang paling optimal dari simulasi pembangkit listrik mikro hidro tanpa *controller*, menggunakan controller SMES, menggunakan controller PI, dan juga menggunakan controller SMES+PI. Tujuan dilakukan perbandingan adalah untuk menunjukkan penggunaan sistem control frekuensi beban sangatlah diperlukan.

Percobaan tanpa controller maksudnya control frekuensi dari pembangkit listrik mikro hidro hanya dilakukan oleh governor saja dan pendeteksi error untuk memberikan umpan balik dari output generator ke turbin air. Sedangkan dengan tambahan controller PI, langsung diumpanbalikkan dari output generator menuju ke input generator induksi itu sendiri, tidak terikat dengan turbin air. Karena yang dikendalikan adalah daya beban generator induksi. Hal ini juga berlaku untuk *controller* SMES maupun *controller* SMES+PI yang dipasang. Untuk *controller* SMES+PI, komponen blok PI controller tidak terpisah satu sama lain dengan controller SMES, tetapi digabungkan dalam satu rangkaian. Dimana blok PI diletakkan dalam rangkaian SMES sebelum blok *gain loop*. Gambar 3.6 menunjukkan diagram blok dari perbandingan sistem pembangkit listrik mikro hidro.



Gambar 3.6 Blok diagram perbandingan pembangkit listrik mikro hidro

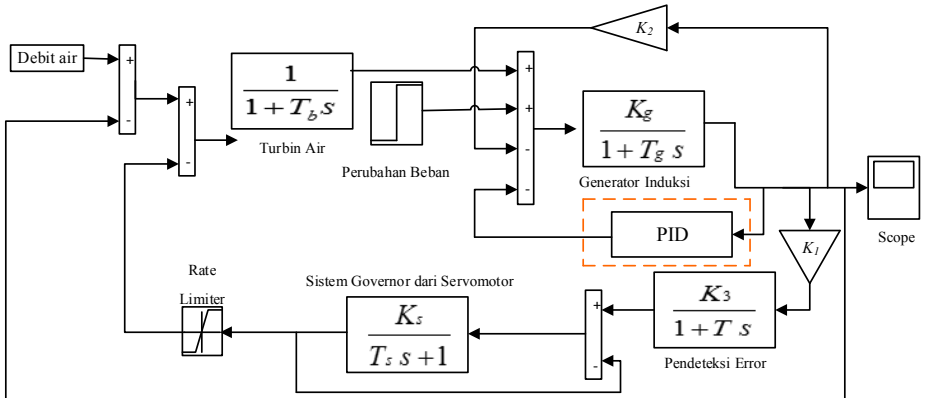
Berikut ini adalah gambar-gambar selengkapya untuk masing-masing sub-sistem yang ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.7 Diagram blok pembangkit listrik mikro hidro tanpa controller

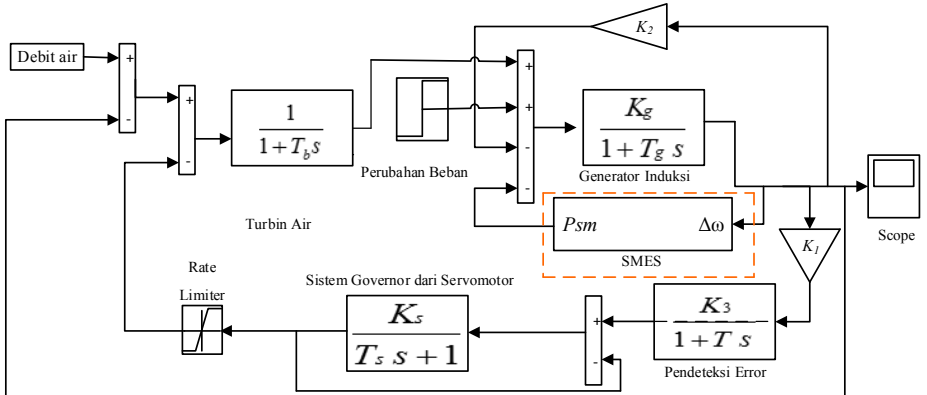
Gambar 3.7 menunjukkan diagram blok pembangkit listrik mikro hidro yang belum dilengkapi controller frekuensi beban yang

diajukan. Jadi sistemnya hanya terdiri dari komponen utama pembangkit listrik mikro hidro.



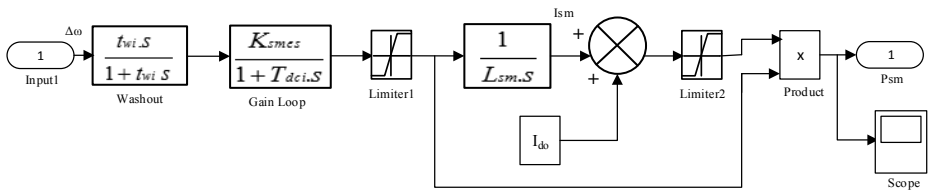
Gambar 3.8 Diagram blok pembangkit mikro hidro dengan controller PI

Gambar 3.8 menunjukkan diagram blok pembangkit listrik mikro hidro yang pada output generator induksi terdapat umpan balik yang dimasukkan pada *controller* PI (control derivatif tidak diaktifkan atau sama dengan nol). Kemudian sinyal dari controller PI tersebut diteruskan untuk masuk kembali pada sisi input generator induksi.



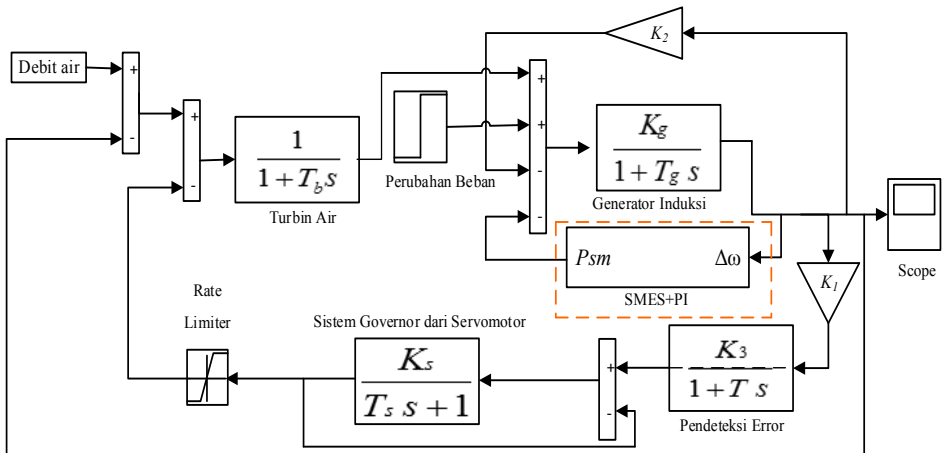
Gambar 3.9a Diagram blok pembangkit mikro hidro dengan SMES

Gambar 3.9a menunjukkan diagram blok pembangkit listrik mikro hidro yang pada sisi output generator terdapat umpan balik yang melalui *controller* SMES untuk dimasukkan kembali pada sisi input generator induksi. *controller* SMES memberikan output berupa P_{sm} yang merupakan daya yang tersimpan dan diolah untuk dimasukkan pada sisi input generator. Letak posisi penempatan *controller* SMES sama dengan menggantikan PID pada diagram sebelumnya. Akan tetapi ketika digabungkan kedua *controller* ini, maka *controller* PID yang simple akan dimasukkan pada rangkaian diagram blok SMES. Karena pada umumnya, *controller* SMES dirangkai dalam satu paket dengan *controller* PID yang sudah terdapat didalamnya. Adapun dalam penelitian tugas akhir ini *controller* SMES dan SMES+PI masing-masing dilihat performanya.

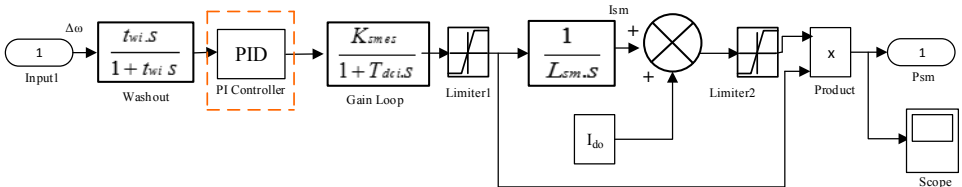


Gambar 3.9b Diagram blok *controller* SMES tanpa dilengkapi komponen PI

Gambar 3.9b menunjukkan diagram blok *controller* SMES yang tidak dilengkapi dengan komponen PI. *Controller* SMES mendapatkan input berupa $\Delta\omega$ dari output generator kemudian dikuatkan oleh K_{smes} melalui konstanta time washout sebelumnya. Setelah itu diberikan batasan saturasi oleh limiter karena keterbatasan implementasi hardware dari SMES. Maka dari itu arus kumparan memiliki batas maksimum dan minimum. Selama beroperasi, batas atas dari arus kumparan diatur $1,38I_{sm0}$, dan batas bawah $0,31I_{sm0}$. Batas dari tegangan terminal adalah $\pm 0,2352$ p.u. lalu dari keluaran limiter pertama berikutnya masuk pada blok induktor yang kemudian memiliki keluaran berupa arus I_{sm} . Arus ini kemudian akan dijumlahkan dengan arus awal I_{do} SMES dan diberikan batasan limiter kedua. Dari sinyal yang dikuatkan sebelum limiter pertama akan dikalikan dengan arus SMES yang akan menghasilkan output P_{sm} yang kemudian digunakan sebagai input generator induksi.



Gambar 3.10a Diagram blok pembangkit listrik mikro hidro dengan *controller* SMES+PI



Gambar 3.10b Diagram blok *controller* SMES yang dilengkapi dengan *controller* PI

Gambar 3.10 menunjukkan diagram blok sistem pembangkit listrik mikro hidro yang telah terpasang *controller* SMES, dimana masukannya berasal dari *output* generator induksi sebagai umpan balik untuk dimasukkan kembali ke generator setelah sinyalnya diproses pada *controller* yang telah diberi tambahan komponen PI didalam *controller* SMES tersebut. Adapun tujuan dari penambahan komponen PI pada *controller* SMES ini adalah untuk meminimalkan nilai *overshoot* dan *settling time* dari respon frekuensi sistem.

Gambar 3.10b menunjukkan diagram blok *controller* SMES yang dilengkapi dengan komponen PI. Dapat dilihat pada gambar tersebut adanya blok “PID” sebelum proses *gain loop*. Adapun control

derivative tidak diaktifkan dan disetting sama dengan nol. Diharapkan dengan menambahkan komponen PI, maka nilai sinyal respon frekuensi (*overshoot* dan *settling time*) yang dihasilkan lebih kecil, yang berarti dapat meningkatkan kestabilan sistem.

Untuk pembahasan-pembahasan hasil simulasi sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro dan juga hasil optimisasi parameter-parameter *control* SMES dan PI menggunakan *firefly algorithm* akan dibahas pada bab 4.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab 4 ini disuguhkan tentang hasil simulasi dan analisis tugas akhir. Simulasi dilakukan untuk membuktikan kesesuaian metode dengan pemodelan sistem yang telah dirancang. Sistem yang digunakan dalam simulasi penelitian tugas akhir ini adalah sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro yang telah dilengkapi dengan *controller Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES). Kemudian, untuk mengoptimalkan parameter-parameter SMES digunakan metode *Firefly Algorithm* (FA) dalam penalaannya. Analisis dilakukan dengan melihat perbandingan respon antara sistem pembangkit mikro hidro tanpa *controller*, sistem dengan *controller* SMES, sistem dengan *controller* PI, dan juga sistem dengan *controller* SMES dan PI.

Pada simulasi penelitian ini, *running* program dilakukan menggunakan *Personal Computer Unit* dengan spesifikasi sebagai berikut:

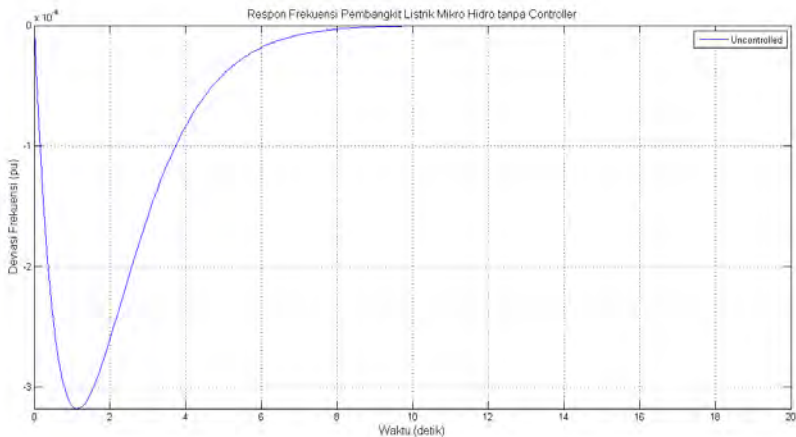
<i>Processor</i>	: AMD A8 5550M Speed 2.1GHz
<i>Memory</i>	: 4,00 GB RAM
<i>Operating System</i>	: <i>Microsoft Windows 8 Pro</i>
<i>Software</i>	: <i>MATLAB-SIMULINK R2009a</i>

4.1 Perbandingan Respon frekuensi pada Sistem Mikro Hidro

Untuk mengetahui respon frekuensi sebuah sistem pembangkit listrik mikro hidro apabila mengalami perubahan beban, maka dilakukan simulasi pada berbagai konfigurasi sistem pembangkit listrik mikro hidro. Diasumsikan besar gangguan (perubahan) beban dalam simulasi ini sebesar 0,01 pu pada sistem pembangkit listrik mikro hidro dan dilakukan selama 20 detik. Setelah itu dilihat respon frekuensi tiap pembangkit, yang akan disajikan pada sub-bab dibawah ini.

4.1.1 Respon Frekuensi pada Sistem Mikro Hidro tanpa Menggunakan *Controller*

Simulasi berikut ini dilakukan pada sistem pembangkit listrik mikro hidro yang tidak dilengkapi dengan *controller*. Setelah dilakukan simulasi, diperoleh hasil seperti pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik respon frekuensi pembangkit mikro hidro tanpa *controller*

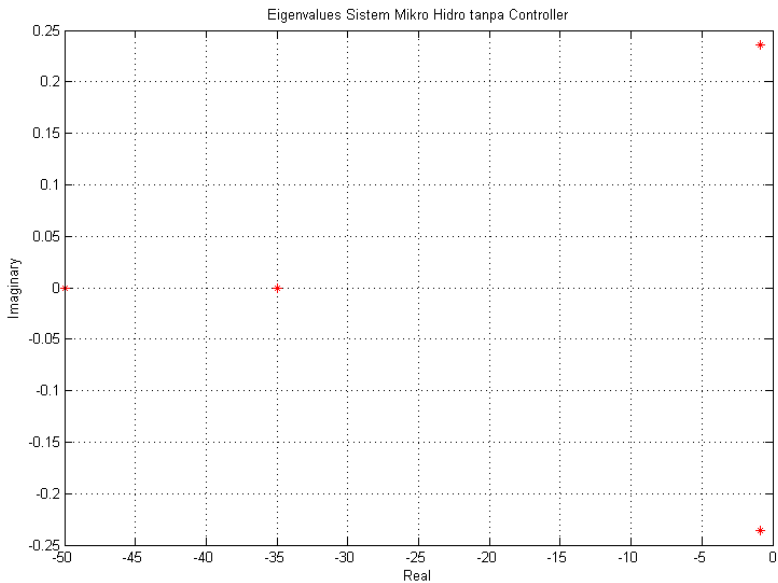
Gambar 4.1 menunjukkan grafik respon frekuensi pembangkit listrik mikro hidro yang tanpa dilengkapi *controller*. Dari grafik tersebut juga dapat diketahui nilai *overshoot* dan *settling time* seperti yang dicantumkan pada table 4.1.

Tabel 4.1 Nilai *overshoot* dan *settling time* gambar 4.1

Karakteristik	Nilai
<i>Overshoot (pu)</i>	-0,000318
<i>Settling time (detik)</i>	7,24

Nilai *overshoot* dan *settling time* yang dihasilkan dari simulasi pembangkit listrik mikro hidro tanpa *controller* pada tabel diatas merupakan nilai *overshoot* dan *settling time* yang paling besar diantara semua simulasi yang dilakukan. Hal ini disebabkan karena *control* frekuensi dari sistem hanya dilakukan oleh governor saja, sehingga sistem yang tidak dilengkapi *controller* frekuensi pada generatornya ini menjadi sistem yang paling tidak stabil diantara sistem lain yang diberi *controller*.

Setelah grafik dari respon frekuensi, dalam tugas akhir ini juga dilakukan analisis melalui grafik dari nilai *eigen value* dari masing-masing respon frekuensi sistem.



Gambar 4.2 Grafik *eigen value* pembangkit listrik mikro hidro tanpa controller

Titik-titik merah yang terdapat pada gambar 4.2 menunjukkan posisi masing-masing dari *eigen value* pada sumbu real dan imajiner respon frekuensi sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro yang tidak dilengkapi dengan *controller*. Untuk nilai detail dari grafik dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 *Eigen value* untuk sistem mikro hidro tanpa controller

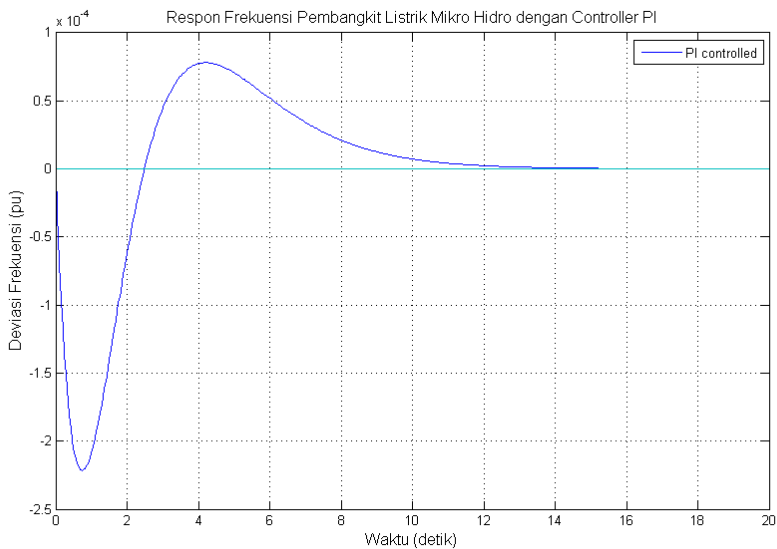
Nilai <i>Eigen</i>
-0.8570 + 0.2360i
-0.8570 - 0.2360i
-49.9999
-35.0001

Tabel 4.2 menunjukkan *eigen value* dari respon frekuensi simulasi sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro yang tidak dilengkapi dengan *controller*. Adapun tujuan dari melihat nilai *eigen*

dari sistem pembangkit yang telah disimulasikan adalah untuk menentukan sistem mana yang paling stabil ketika terjadi perubahan beban ataupun gangguan yang lain.

4.1.2 Respon Frekuensi pada Sistem Mikro Hidro Menggunakan *Controller PI*

Selanjutnya pada sub-bab 4.1.2 ini dilakukan simulasi pada sistem pembangkit listrik mikro hidro yang dilengkapi dengan *controller PI*. Setelah simulasi dilakukan, diperoleh hasil respon frekuensi seperti pada gambar 4.3



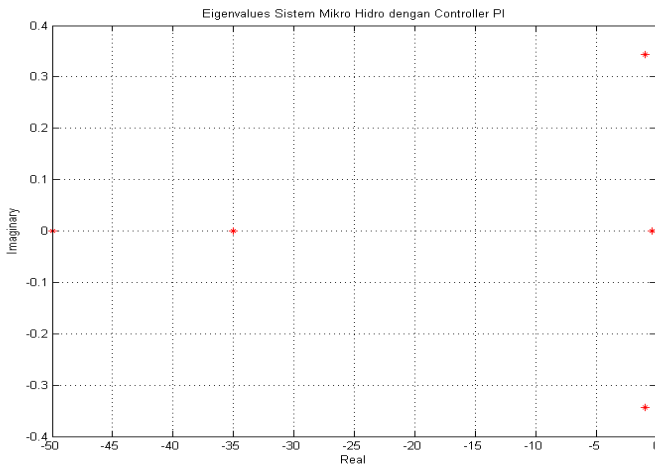
Gambar 4.3 Grafik respon frekuensi pembangkit mikro hidro yang dilengkapi *controller PI*

Dapat dilihat dari gambar 4.3 bahwa ketika terjadi perubahan beban atau gangguan, frekuensi sistem berosilasi terlebih dahulu sebelum mencapai kondisi tunaknya (*steady state*). Adapun nilai *overshoot* yang terjadi dan juga *settling time* nya detailnya dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai *overshoot* dan *settling time* sistem dengan *controller PI*

Karakteristik	Nilai
<i>Overshoot (pu)</i>	-0,000225 dan 0,00006708
<i>Settling time (detik)</i>	13,6

Dapat dilihat dari nilai yang tertera pada tabel 4.3 bahwa dengan pemasangan *controller PI*, frekuensi sistem berosilasi antara -0,000225 pu hingga 0,00006708 pu terhadap 0 ketika terjadi gangguan seperti perubahan beban. Kemudian, peredaman osilasi tersebut membutuhkan waktu 13,6 detik. Jika dibandingkan dengan respon frekuensi sistem yang tidak dilengkapi dengan *controller PI* maupun SMES, nilai *overshoot* nya menjadi lebih kecil, namun nilai waktu peredamannya (*settling time*) menjadi lebih lama dibandingkan dengan sistem yang tidak dipasang *controller*. Adapun analisis grafik eigen dan nilai dari eigen untuk sistem yang telah dilengkapi dengan *controller PI* ini dapat dilihat pada gambar 4.4 dan tabel 4.4.



Gambar 4.4 Grafik *eigen value* pembangkit mikro hidro dengan *controller PI*

Posisi dari masing-masing *eigen value* dari sistem pembangkit mikro hidro dengan *controller PI* dapat dilihat dari gambar 4.4, Jumlah *eigen value* yang ada bertambah dibandingkan dengan sistem tanpa *controller*. Karena dengan penambahan blok *controller*

pada sistem, maka matriks state-space dari diagram blok sistem juga bertambah. Sehingga, total *eigen value* yang ada untuk sistem pun bertambah pula. Untuk hasil detail nilai *eigen* nya, ditunjukkan pada tabel 4.4.

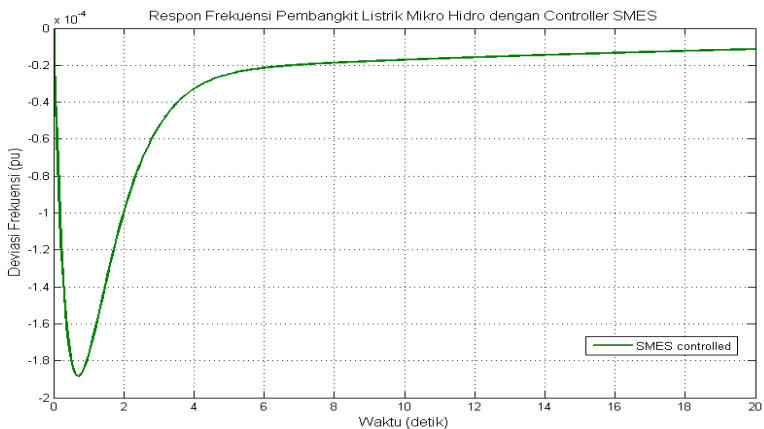
Tabel 4.4 Eigen value sistem mikro hidro dengan *controller* PI

<i>Eigen Value</i> dengan PI
-49.9999
-35.0001
-0.3562
$-0.9767 + 0.3431i$
$-0.9767 - 0.3431i$

Jika dilihat dari *eigen value*, sistem pembangkit dengan *controller* PI memiliki nilai *eigen* yang paling besar diantara semua simulasi sistem yang dilakukan. Hal ini berarti bahwa sistem ini merupakan sistem yang memiliki kestabilan lebih rendah dibandingkan sistem lainnya ketika terjadi gangguan atau perubahan beban.

4.1.3 Respon Frekuensi pada Sistem Mikro Hidro Menggunakan *Controller* SMES

Hasil simulasi untuk sistem pembangkit mikro hidro yang dilengkapi dengan *controller* SMES dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Respon frekuensi pembangkit mikro hidro dengan *controller* SMES

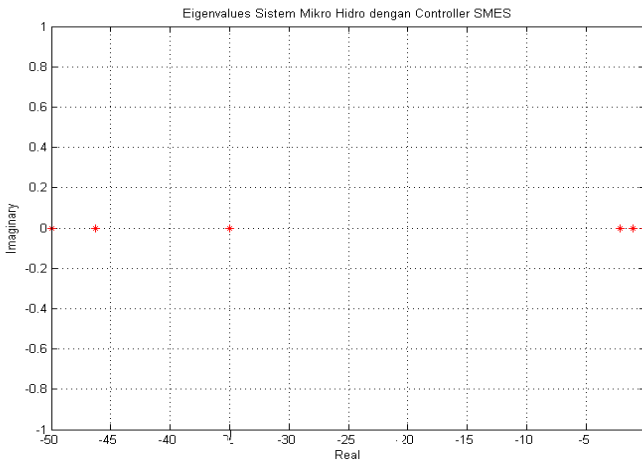
Dapat dilihat dari gambar 4.5 hasil respon frekuensi untuk sistem pembangkit listrik mikro hidro dengan *controller* SMES yang telah dipasang tanpa *controller* PI didalamnya. Dari grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa nilai *overshoot* dan nilai *settling time* nya yaitu seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Nilai *overshoot* dan *settling time* sistem dengan SMES

Karakteristik	Nilai
<i>Overshoot (pu)</i>	-0,000187
<i>Settling time (detik)</i>	>20

Nilai *overshoot* yang pada sistem ini sebesar -0,000187 pu menunjukkan bahwa ketika sistem mengalami perubahan beban atau gangguan, maka frekuensi sistem turun sebesar 0,000187 pu, dan akan kembali pada nilai tunak nya setelah setelah 20 detik lebih. Tentunya *settling time* sebesar ini merupakan kondisi yang tidak baik untuk sebuah sistem pembangkit listrik ditinjau dari kestabilannya. Apabila frekuensi tidak kembali pada kondisi *steady state* setelah terjadi perubahan beban atau gangguan lainnya, maka sistem pembangkit itu sendiri akan terganggu bahkan hingga gangguan itu juga dapat dirasakan oleh pelanggan listrik pembangkit tersebut.

Selain nilai frekuensi, perlu juga dilihat grafik *eigen value* dari simulasi pembangkit. Seperti yang ditunjukan gambar 4.6.



Gambar 4.6 Eigen value pembangkit mikro hidro dengan *controller* SMES

Gambar 4.6 menunjukkan posisi pada sumbu real dan imajiner untuk masing-masing *eigen value* sistem pembangkit listrik mikro hidro yang dilengkapi dengan *controller* SMES. Adapun detail nilai untuk setiap titik *eigen value* nya dapat dilihat pada tabel 4.6.

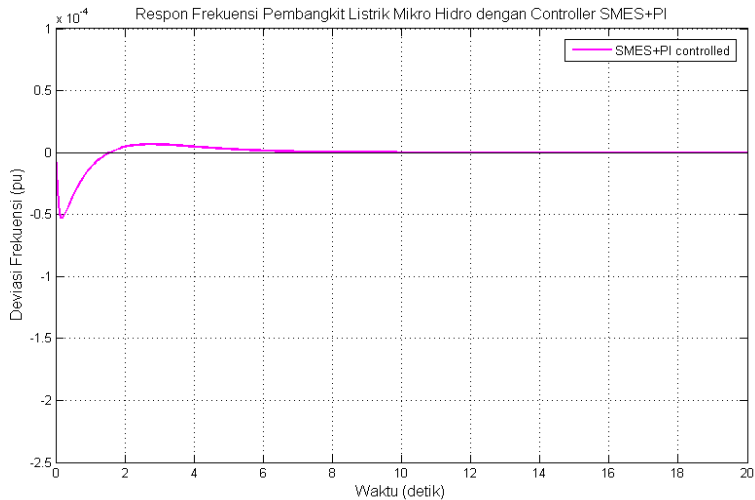
Tabel 4.6 *Eigen Value* untuk sistem dengan controller SMES

<i>Eigen Value</i> dengan SMES
0
-50.0000
-35.0001
-46.2515
-2.1434
-1.0632
-0.0421

Dapat dilihat pada tabel 4.6, *eigen value* dari sistem pembangkit mikro hidro yang dilengkapi controller SMES lebih negatif dibandingkan dengan dua sistem sebelumnya. Akan tetapi, hal ini tentunya belum memenuhi hasil yang diharapkan sebenarnya. Oleh sebab itu, pada simulasi selanjutnya disimulasikan sistem pembangkit listrik mikro hidro yang dilengkapi dengan *controller* SMES dan ditambahkan dengan *controller* PI didalamnya.

4.1.4 Respon Frekuensi pada Sistem Mikro Hidro Menggunakan *Controller* SMES+PI

Pada simulasi sistem sebelumnya diperoleh hasil yang kurang memuaskan yaitu memiliki waktu peredaman frekuensi yang terlalu lama, lebih dari dua puluh detik. Oleh karena itu, pada simulasi yang keempat ini, ditambahkan lagi sebuah komponen control blok PI pada *controller* SMES pada sistem berbeda dengan simulasi sebelumnya yang hanya menggunakan *controller* SMES saja tanpa PI. Dengan menggabungkan kedua *controller* ini diharapkan dapat saling melengkapi satu sama lainnya. Untuk hasil simulasinya dapat dilihat pada gambar 4.7.



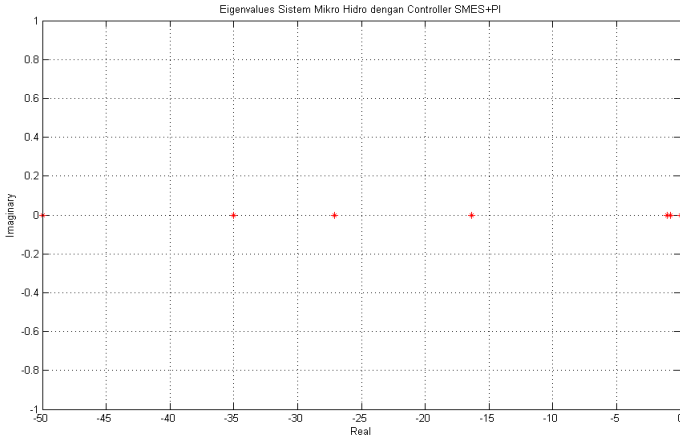
Gambar 4.7 Grafik respon frekuensi untuk sistem pembangkit mikro hidro yang dilengkapi *controller* SMES+PI

Gambar 4.7 menunjukkan nilai perubahan frekuensi terhadap waktu untuk sistem pembangkit mikro hidro dengan menggunakan *controller* SMES sekaligus PI didalamnya. Dari grafik tersebut, diperoleh nilai osilasi frekuensi yaitu hanya dari -0,0000528 hingga 0,00000664. Dan juga waktu peredaman yang lebih singkat dibandingkan sistem yang lain. Sehingga sistem ini merupakan sistem yang memiliki respon frekuensi paling bagus dibandingkan dengan tiga sistem lain yang disimulasikan sebelumnya. Karena memiliki nilai *overshoot* yang semakin mendekati nol, dan nilai *settling time* yang semakin kecil. Adapun nilai *overshoot* dan *settling time* nya dapat dilihat pada tabel 4.7

Tabel 4.7 Nilai *overshoot* dan *settling time* untuk sistem mikro hidro dengan *controller* SMES+PI

Karakteristik	Nilai
<i>Overshoot (pu)</i>	-0,0000528 dan 0,00000664
<i>Settling time (detik)</i>	4,84

Selain dilihat dari nilai *overshoot* dan *settling time* dari respon frekuensinya, dalam kestabilan sistem tenaga listrik perlu juga untuk ditinjau *eigen value* dari sistem tersebut. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.8.



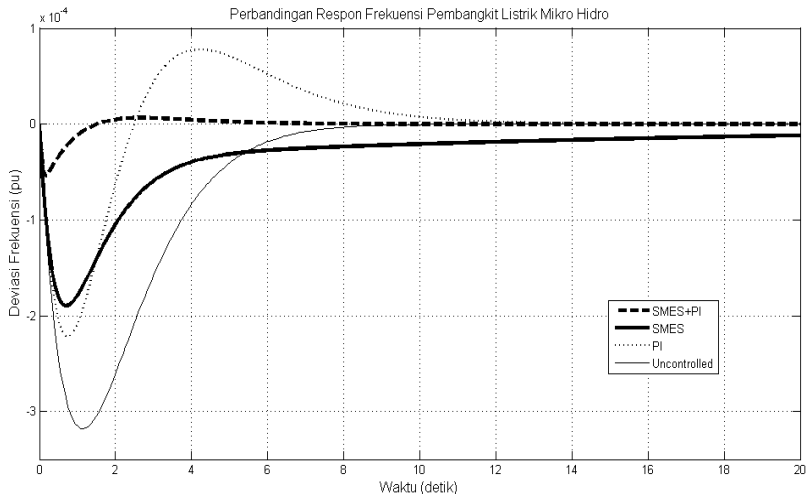
Gambar 4.8 Grafik *eigen value* sistem pembangkit mikro hidro dengan controller SMES+PI

Titik-titik merah pada gambar 4.8 menunjukkan posisi masing-masing dari *eigen value* dari respon frekuensi sistem yang dilengkapi dengan *controller* SMES+PI. Adapun untuk nilainya masing-masing dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 *Eigen value* untuk mikro hidro dengan *controller* SMES+PI

<i>Eigen Value</i> dengan SMES+PI
0
-50.0000
-34.9998
-27.7370
-16.2040
-1.0478
-0.8530
-0.0001

Karena nilai eigen value yang semakin kecil (semakin negatif) itu menunjukkan bahwa sistem yang dirancang semakin stabil ketika mengalami perubahan beban dari pelanggan ataupun gangguan lainnya seperti yang terdapat pada simulasi.



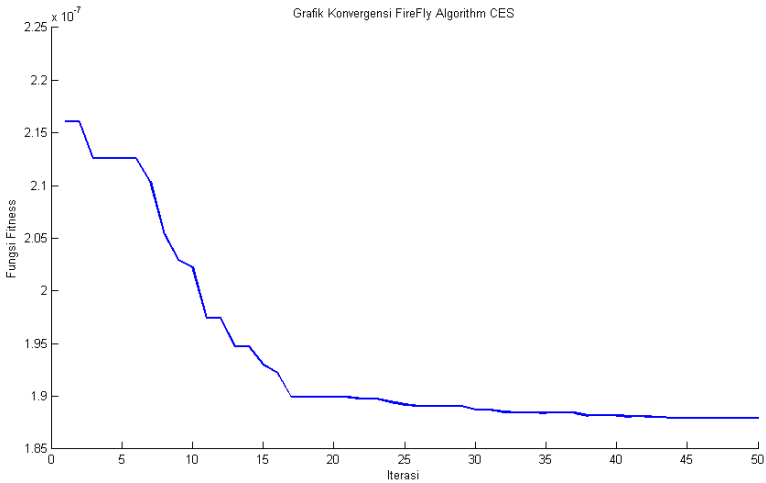
Gambar 4.9 Grafik perbandingan respon frekuensi

Dari empat model sistem pembangkit listrik mikro hidro yang telah disimulasikan, dan ditinjau dari grafik respon frekuensi serta *eigen value* nya, dapat disimpulkan bahwa suatu pembangkit listrik mikro hidro mutlak memerlukan *controller* sebagai peredam osilasi frekuensi yang terjadi akibat perubahan beban. *Controller* SMES+PI yang diajukan dalam penelitian ini memiliki pengaruh yang signifikan dalam peredaman osilasi tersebut dan cocok diterapkan untuk sistem pembangkit mikro hidro.

4.2 Perbandingan Respon Frekuensi Sistem Pembangkit Mikro Hidro dengan *Energy Storage* Berbeda

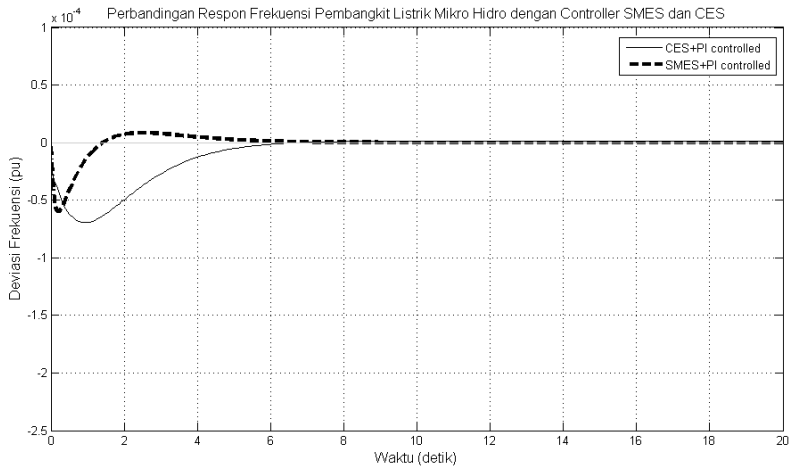
Penelitian ini bertujuan untuk menyempurnakan desain *Load Frequency Control (LFC)* yang sudah ada sebelumnya, yaitu dengan menggunakan *controller Capacitive Energy Storage (CES)*. Penyempurnaan ini dengan mengganti komponen penyimpan energi

CES menjadi SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) yang secara umum lebih baik daripada CES. Selain itu, juga digunakan metode kecerdasan buatan yang lebih terkini dibandingkan *Particle Swarm Optimization (PSO)*, yaitu metode *Firefly Algorithm (FA)*. Maka pada sub-bab ini akan disajikan komparasi antara kedua penyimpanan energi ini dengan menggunakan satu kecerdasan buatan yang sama, yaitu *firefly algorithm*.



Gambar 4.10 Grafik konvergensi metode FA pada sistem dengan CES

Pada gambar 4.10, menunjukkan grafik konvergensi dari proses optimisasi menggunakan metode *firefly algorithm*. Grafik konvergensi menjelaskan bagaimana suatu proses pencarian nilai paling optimal oleh parameter yang dioptimisasi sebanyak jumlah iterasi maksimum yang diinginkan (pada simulasi ini, iterasi maksimum yang digunakan adalah sebanyak lima puluh iterasi). Untuk sistem mikro hidro dengan *controller* SMES ini, sistem mencapai status konvergen pada iterasi ke 44. Sehingga diperoleh nilai konstanta penyimpanan energi CES sesuai dengan diagram blok nya.



Gambar 4.11 Grafik perbandingan respon frekuensi sistem dengan SMES dan CES

Dapat dilihat dari gambar 4.11, kurva respon frekuensi untuk sistem yang menggunakan *controller* CES lebih besar dibandingkan dengan sistem yang menggunakan *controller* SMES. Artinya respon frekuensi untuk sistem dengan *controller* SMES+PI lebih baik karena memiliki *overshoot* frekuensi yang lebih rendah dan juga *settling time* nya sedikit lebih baik dalam peredaman osilasi.

Tabel 4.9 Nilai *overshoot* dan *settling time*

Karakteristik	SMES+PI	CES+PI
<i>Overshoot</i> (pu)	-0,0000528 dan 0,00000664	-0,0000695
<i>Settling time</i> (detik)	4,84	5,23

Tabel 4.9 menunjukkan detail nilai *overshoot* dan *settling time* grafik perbandingan respon frekuensi dua sistem yang disimulasikan. Waktu yang diperlukan untuk peredaman osilasi frekuensi untuk kedua sistem ini tidak terpaut jauh, yaitu memiliki perbedaan sekitar 0,4 detik. Walaupun demikian, dapat disimpulkan respon frekuensi sistem dengan *controller* SMES+PI lah yang lebih baik untuk penerapan pada pembangkit listrik mikro hidro.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan simulasi yang telah dilakukan pada tugas akhir, diperoleh beberapa hal yang dapat dijadikan kesimpulan dari penelitian, yaitu :

1. Adanya perubahan nilai beban listrik dari pelanggan mengakibatkan perubahan respon frekuensi pada sisi pembangkit, dan juga dapat mengganggu stabilitas sistem.
2. Sebuah sistem pembangkit listrik pada umumnya, dan sistem pembangkit listrik mikro hidro pada khususnya membutuhkan sistem *Load Frequency Control* (LFC) berupa *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) untuk memberikan kompensasi terhadap osilasi frekuensi akibat adanya perubahan beban listrik. Selain itu, *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) juga dapat berfungsi sebagai eksitasi eksternal generator induksi.
3. Dengan menggunakan *firefly algorithm* sebagai metode penelitian, dapat dicari nilai parameter-parameter control yang ingin dioptimisasi dari sebuah *controller Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) dan *controller* PI didalamnya. Dari hasil simulasi, didapatkan nilai K_{smes} sebesar 80,77 dan T_w sebesar 6,38 serta T_{dc} dengan nilai delay 0,019.
4. Dengan menggunakan *energy storage* SMES pada sistem *Load Frequency Control* yang dirancang, dapat memperbaiki respon frekuensi sebuah sistem pembangkit mikro hidro dibandingkan dengan penggunaan *energy storage* yang lain. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *settling time* sebesar 4,84 yang merupakan nilai *settling time* tercepat dan juga nilai *overshoot* sebesar -0,0000528 yang merupakan nilai *overshoot* terkecil.
5. Sesuai dengan kriteria kestabilan *Routh-Hurwitz*, bahwa apabila akar-akar persamaan karakteristik suatu sistem bernilai sama (negatif semua atau positif semua), maka sistem dikatakan stabil.

Dengan menggunakan sistem yang dilengkapi dengan *controller* SMES+PI, didapatkan nilai *eigen value* yang paling negatif (minus) dari keseluruhan sistem yang diuji. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *controller* SMES+PI tersebut menghasilkan sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro yang paling stabil ketika mengalami gangguan.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Selain menggunakan metode *firefly algorithm* dalam penalaan parameter-parameter control dari sistem, juga dapat digunakan metode kecerdasan buatan lainnya agar dapat diketahui metode yang paling optimal dan teliti dalam proses optimisasinya.
2. Penggunaan *controller* SMES+PI sebagai *Load Frequency Control* (LFC) juga dapat dicoba pada sistem yang lebih besar dan kompleks dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik mikro hidro *standalone* pada penelitian ini.

INDEKS

A
Algoritma, 3, 29, 30, 31, 32
Adjustable blade, 12

B
Bioluminescence, 29
Bus, 9, 23, 26
Beban Listrik, 4, 5
Bendungan Pengalih, 20
Bak Penenang, 20
Ballast Load, 19
Boiler, 11

C
Capasitive Energy Storage, 57,59
Controller, 3, 33, 40, 41, 42, 43, 44
Cyrogenic, 23, 24, 27
Clean Energy, 11

D
Daya aktif, 9
Daya reaktif, 9
Diversion weir, 20
Droop, 18

E
Eksitasi, 5, 15
Electronic Load Controller, 19
Eigen Value, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 56, 57

F
Frekuensi, 2, 3, 4, 21, 33, 35, 36, 39, 40, 41, 44, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59
Firefly Algorithm, 2, 3, 4, 29, 31, 32, 33, 34, 37, 45, 47, 58
Fungsi Objektif, 30
Fixed blade, 12

G
Governor, 5, 6, 18, 19, 20, 21, 34, 35, 37, 40, 48
Generator, 2, 3, 26, 27, 31, 34, 35, 37, 40, 42, 43, 44

H
Head Gate, 14
Headrace, 20, 21
Headtank, 20

I
Interkoneksi, 8, 22

K
Konvergensi, 31, 39, 58
Kestabilan Transien, 7, 8
Kestabilan Dinamik 10

L
Load Frequency Control, 2, 21, 22, 57
Large-disturbance voltage stability, 9
Long term voltage stability, 9

M
Mikro hidro, 1, 2, 3, 4, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 21, 33, 34, 35, 36, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58
Matlab - Simulink , 3, 4, 29, 47

O
Optimisasi, 30, 31, 33, 34, 39, 45
Overshoot, 33, 44, 45, 48, 50, 51, 53, 55, 56, 59

P
Power House, 21
Penstock, 20, 21
Parameter , 2, 3, 21, 27, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 45, 47, 58
PID, 3, 40, 43, 44,

S
Sand trap, 20, 21
Settling time, 33, 34, 45, 48, 50, 51, 53, 55, 56, 58, 59
SMES, 2, 3, 4, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 33, 34, 36, 37, 39, 40, 43, 44, 45, 47, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59
Small disturbance voltage stability, 9

Short term voltage stability, 9

T

Turbin Air, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 35, 40,

Transfer function, 14, 18

V

Voltage Source Converter, 24

W

Water starting time, 14

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kundur, P., "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc, 1993
- [2] Imam Robandi, "Modern Power System Control" , Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2009
- [3] Imam Robandi, "Desain Sistem Tenaga Modern: Optimasi, Logika Fuzzy, dan Algoritma Genetika", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2006.
- [4] DS. Henderson, "An advanced electronic load governor for control of Micro hydroelectric power generation", IEEE Transactions Energy Conversion, Vol.13, No.3, September 1998.
- [5] Muh Budi R Widodo, Soedibyo, Ali Musyafa, dan Imam robandi "Aplikasi Fuzzy PIPD pada Pengendali Wicket Gate pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro" Prosiding Seminar Nasional Basic Science 7, Malang, 2010
- [6] M. Hammandlu, H. Goyal, "Proposing a new advanced control technique for micro hydro power plants", Electrical power and Energy System, 2008
- [7] Saadat Hadi, "Power System Analysis" McGraw-Hill 1999
- [8] Yang, X. S. (2009). "Firefly algorithms for multimodal optimization". *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009*. Lecture Notes in Computer Sciences 5792. pp. 169–178.[arXiv:1003.1466](https://arxiv.org/abs/1003.1466).
- [9] Dwaraka S. Padimiti and Badrul H. Chowdhury, "Superconducting Magnetic Energy Storage System (SMES) for Improved Dynamic System Performance", Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE

- [10] Mochamad AVID Fassamsi, "Optimal Tuning Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) menggunakan Imperialist Competitive Algorithm (ICA) Untuk Meredam Osilasi Daya Pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV" Tugas Akhir, Teknik Elektro ITS 2010
- [11] Y. S. Lee and C. J. Wu, "Application of Superconducting Magnetic Energy Storage Unit on Damping of Turbogenerator Subsynchronous Oscillation", IEE Proceedings-C, Vol. 138, pp. 419-426, 1991.
- [12] Y. S. Lee and C. J. Wu, "Application of Superconducting Magnetic Energy Storage Unit to Improve the Damping of Synchronous Generator", IEEE Transactions-EC, Vol. 6, No.4, December 1991.
- [13] Yang, X. S. (2008). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Frome: Luniver Press. ISBN 1-905986-10-6.
- [14] Dimas Angriawan Santoso "Perancangan Load Frequency Control (LFC) dengan Capacitive Energy Storage (CES) menggunakan Particle Swarm Optimization dan Bacteria Foraging Algorithm pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro" Tugas Akhir, Teknik Elektro, ITS 2014.
- [15] Herlambang Setiadi "Penalaan Parameter Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Menggunakan Firefly Algorithm (FA) Pada Sistem Tenaga Listrik Multimesin" Tugas Akhir, Teknik Elektro, ITS 2014

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis bernama lengkap Tsabit Mustarin adalah anak keempat dari enam bersaudara dari pasangan Bapak Mustarin dan Ibu Salmah, yang lahir di Makassar 1 Agustus 1992. Penulis memulai jenjang pendidikan sekolah dasar di SDN Mallengkeri Bertingkat Makassar, setelah lulus sekolah dasar tahun 2004, penulis melanjutkan sekolah ke SMPS Ponpes IMMIM Makassar, dan lulus tahun 2007. Setelah lulus, penulis kemudian melanjutkan sekolah kembali di Ponpes yang sama MA IMMIM Makassar. Setelah lulus dari Ponpes IMMIM Makassar pada tahun 2010, penulis melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Teknik Elektro dan mengambil konsentrasi bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis juga aktif dalam berbagai kegiatan selama menempuh studi S1 yaitu Futsal ITS, CSSMORA ITS, dan member lab PSOC (Power System Operation and Control) Teknik Elektro ITS. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email: tsabit.mustarin@gmail.com